

Rubens Bernardes de Carvalho

**SISTEMA AUTOMÁTICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE  
LÂMINAS DE AÇO PARA EPSTEIN PADRÃO.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Viane Leite

Coorientador: Prof. Dr. Sebastião Lauro Nau

Florianópolis  
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Carvalho, Rubens Bernardes de

Sistema automático para caracterização de lâminas de aço  
para Epstein padrão / Rubens Bernardes de Carvalho ;  
orientador, Jean Vianeil Leite ; co-orientador, Sebastião  
Lauro Nau. - Florianópolis, SC, 2013.  
178 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Caracterização de materiais  
magnéticos. 3. Quadro de Epstein. 4. Sistema automático de  
medição. 5. Perdas no ferro. I. Leite, Jean Vianeil. II.  
Nau, Sebastião Lauro. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
IV. Título.

Rubens Bernardes de Carvalho

## **SISTEMA AUTOMÁTICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE LÂMINAS DE AÇO PARA EPSTEIN PADRÃO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 29 de novembro de 2013.

---

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.  
Coordenador do Curso

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Pedro Armando da Silva Jr., Dr.  
Instituto Federal de Educação de Santa Catarina

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado às  
pessoas com as quais convivemos  
intimamente e sem as quais a atual  
existência seria sem sentido – à  
família.



## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa parceira que facultou o acesso às suas dependências, forneceu as amostras para os ensaios de validação, além de proporcionar discussões proveitosas com o corpo técnico ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do curso de pós-graduação que contribuíram para nossa formação técnica, especialmente aos doutores Jean Viane Leite (orientador), Sebastião Lauro Nau (coorientador) e Nelson Jhoe Batistella pelo apoio, orientação, incentivo e discussões técnicas acerca dos temas aqui tratados.

Aos senhores José Mauro Stringari (Empresa) e Maurício Rigone (GRUCAD) pela colaboração na realização de uma série de ensaios de caracterização de materiais magnéticos.

Aos colegas de curso pelas discussões construtivas acerca dos temas aqui tratados.

À equipe administrativa do GRUCAD e da secretaria do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica que, em diferentes momentos nos prestaram imensa ajuda, algumas vezes sem o perceberem, evitando os deslocamentos entre cidades, nos auxiliando e orientando adequadamente nos meandros burocráticos da instituição.

Aos nossos pais Cláudio Baptista de Carvalho e Arloy Bernardes de Carvalho pelos exemplos, incentivos, oportunidades de estudo e autodesenvolvimento que ora refletem em nossa história recente.

À nossa companheira incansável Luciana Lima Dias de Carvalho que optou por compartilhar conosco as alegrias e tristezas, os sucessos e insucessos, os momentos felizes e os difíceis de nossa caminhada evolutiva, que sempre nos incentivou, abrindo mão, inúmeras vezes dos momentos de nossa vida, a fim de que pudéssemos levar adiante os projetos dessa dissertação.

Aos filhos Matheus, Guilherme e Felipe Dias de Carvalho pela paciência que tiveram conosco na renúncia dos momentos de convivência familiar para que pudéssemos desenvolver este estudo.

Aos inúmeros entes queridos que, de uma forma ou de outra nos apoiaram, incentivaram, colaboraram e torceram para que pudéssemos, nesta etapa de nossa vida, concluir este trabalho.

A Deus que, pela sua onisciência infinita, nos permite cair para que possamos aprender a caminhar, que faz de nossos erros oportunidades para futuros acertos, nos facultando o recomeço e o

aprendizado constante enriquecidos pelas lições e experiências adquiridas.

E finalmente estendemos esse agradecimento a todas as pessoas que, embora não citadas nominalmente, contribuíram de diversas formas e meios, direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.



Fé inabalável é somente aquela que pode encarar a razão face a face, em todas as épocas da humanidade.

(Hippolyte Léon Denizard Rivail, 1857)



## RESUMO

A caracterização de materiais magnéticos fornece informações importantes sobre o desempenho dos materiais em diferentes condições de trabalho. Na indústria, é importante conhecer o comportamento dos aços utilizados como matéria prima, uma vez que faculta a otimização do projeto de máquinas elétricas, fornece subsídios ao controle de qualidade, suprimentos e aos próprios setores fabris sobre o comportamento do material sob condições de operação específicas e normalizadas. Esta dissertação descreve as etapas de desenvolvimento, testes e validação empregadas na modernização de uma bancada analógica industrial para a caracterização de materiais magnéticos. A automação de processos industriais traz como vantagem um alto grau de repetibilidade, menor interferência do operador no processo de medição, ganho de tempo na execução do ensaio. Um sistema analógico e outro digital, ambos com controle em malha aberta e um sistema digital comercial, com controle em malha fechada foram as topologias analisadas no decorrer do presente texto. A comparação dos resultados obtidos na bancada desenvolvida com valores medidos em uma bancada comercial foi utilizado como referência para validação dos resultados.

**Palavras-chave:** Quadro de Epstein. Caracterização de materiais magnéticos. Perdas no ferro. Sistema automático de medição.



## ABSTRACT

The characterization of magnetic materials provides important information about the performance of materials under different working conditions. In industry, it is important to know the behavior of the steels used as raw material, as permitted by the design optimization of electrical machines, provides subsidies to quality control, supply and manufacturing sectors themselves on the material behavior under specific operating conditions and normalized. This dissertation describes the stages of development, testing and validation used in the modernization of an industrial analog bench for the characterization of magnetic materials. The industrial process automation brings some advantage for example a high degree of repeatability, lower operator interference in the measurement process and save time testing. One analog and one digital system, both with open loop control and a commercial digital system with closed loop control were the topologies analyzed in the course of this text. A comparison of the results obtained at the bench measured values developed in a commercial bench was used as reference to validate the results.

**Keywords:** Epstein frame. Magnetic material characterization. Iron losses. Automated measurement system.



## LISTAS DE FIGURAS

Figura 2-1 – Ensaio de Epstein versus Ensaio em Chapa Única região sob o enrolamento com campo magnético de 20 A/m. ....	38
Figura 2-2 - Perdas por correntes induzidas com variação de frequência para campo magnético de 20 A/m. ....	38
Figura 2-3 - Perdas não lineares no domínio do tempo com campo magnético máximo ( $H_m$ ) de 189.2 A/m. ....	39
Figura 3-1 – Efeito da variação da resistência rotórica .....	43
Figura 3-2 – Variação do rendimento em função da resistência rotórica .....	44
Figura 3-3 – Separação de perdas em motores de indução padrão.....	45
Figura 3-4 – Contribuição das parcelas individuais de perdas nas perdas totais da máquina.....	46
Figura 3-5 – Perdas no ferro [%] x Potência [cv] nos motores de indução para diferentes polaridades.....	47
Figura 3-6 – Variação das perdas totais e de B50 com o ângulo de corte das amostras. ....	49
Figura 3-7 – Perdas no ferro com diferentes sentidos de laminação .....	50
Figura 3-8 – Contribuição das parcelas Ph, Pp e Pa nas perdas totais...	51
Figura 4-1 – Perdas em 60 Hz para duas classes de aços .....	55
Figura 4-2 – Perdas do aço carbono com aumento da frequência .....	56
Figura 4-3 - Perdas do aço silício com aumento da frequência.....	56
Figura 4-4 – Curva BxH de um aço carbono.....	57
Figura 4-5 – Curva BxH para um aço silicioso .....	58
Figura 4-6 – Etapas de corte do processo de estampagem .....	64
Figura 4-7 – Seção de corte de um aço SP (MEV).....	65
Figura 4-8 – Aço carbono: a) 1006 ST e b) 1006 TT .....	67
Figura 4-9 – Aço silício: a) 50A400 ST e b) 50A400 TT .....	68
Figura 4-10 – Influência do %Si em algumas propriedades intrínsecas do Fe.....	71
Figura 4-11 - Representação das componentes das perdas no ferro.....	72
Figura 4-12 – Lâmina de material ferromagnético.....	74
Figura 4-13 – Sentido da densidade de corrente .....	74
Figura 4-14 – Ímãs elementares .....	78
Figura 4-15 – Laço de histerese de um material magnético com caracterização aproximada de suas regiões.....	79
Figura 5-1 – Quadro de Epstein .....	86
Figura 5-2 – Posicionamento das lâminas no quadro de Epstein. ....	87

Figura 5-3 – Reta para a determinação da separação de perdas.....	90
Figura 5-4 – Característica do Indutor .....	92
Figura 6-1 – Fontes de alimentação do SAMA, para a os ensaios de caracterização de materiais magnéticos .....	96
Figura 6-2 – Diagrama de blocos do SAMA .....	96
Figura 6-3 – Circuito esquemático da bancada analógica.....	97
Figura 6-4 – Bancada do SAMA para caracterização de materiais magnéticos .....	98
Figura 6-5 – Diagrama de blocos do sistema automático .....	105
Figura 6-6 – Circuito esquemático do quadro de Epstein .....	105
Figura 6-7 - Esquema simplificado da bancada automática.....	106
Figura 6-8 – Bancada automática para a caracterização de materiais magnéticos. ....	107
Figura 6-9 – Tela de abertura do <i>software</i> para caracterização de materiais magnéticos.....	110
Figura 6-10 – Entrada de dados do <i>software</i> de ensaio.....	111
Figura 6-11 – Procedimento de desmagnetização da amostra .....	111
Figura 6-12 – Ensaio para a medição de perdas magnéticas.....	112
Figura 6-13 – Dados de ensaio que serão armazenados em um arquivo de saída .....	113
Figura 6-14 – Bancada de Referência do GRUCAD. ....	114
Figura 6-15 – Diagrama de blocos do SDMF.....	115
Figura 7-1 – Perdas das amostras de referência .....	121
Figura 8-1 – Variação da diferença percentual medida em relação aos valores de referência aço sem processamento.....	124
Figura 8-2 - Variação da diferença percentual medida em relação aos valores de referência aço semiprocessado.....	125
Figura 8-3 – Variação da diferença percentual medida em relação aos valores de referência aço totalmente processado .....	126
Figura 8-4 – Perdas totais da amostra A1 .....	128
Figura 8-5 - Perdas totais da amostra A2.....	128
Figura 8-6 – Separação de perdas amostra A1 .....	129
Figura 8-7 - Separação de perdas amostra A2.....	129
Figura 8-8 – Composição das perdas totais A1.....	129
Figura 8-9 - Composição das perdas totais A2 .....	130
Figura 8-10 – Perdas totais da amostra A3 .....	132
Figura 8-11 - Separação de perdas amostra A3.....	132
Figura 8-12 – Composição das perdas totais A3.....	132
Figura 8-13 - Perdas totais da amostra A4.....	134
Figura 8-14 - Perdas totais da amostra A5 .....	134
Figura 8-15 - Separação de perdas amostra A4.....	135



Figura 8-16 - Separação de perdas amostra A5.....	135
Figura 8-17 – Composição das perdas totais A4.....	135
Figura 8-18 – Composição das perdas totais A5.....	136
Figura 8-19 - Perdas totais da amostra A6.....	138
Figura 8-20 - Perdas totais da amostra A7.....	138
Figura 8-21 - Separação de perdas amostra A6.....	139
Figura 8-22 - Separação de perdas amostra A7.....	139
Figura 8-23 – Composição das perdas totais A6.....	140
Figura 8-24 – Composição das perdas totais A7.....	140
Figura 8-25 – Perdas totais na amostra A8.....	142
Figura 8-26 – Separação de perdas amostra A8.....	142
Figura 8-27 – Composição das perdas totais.....	143
Figura 8-28 – Valores de perdas calculadas totais em relação à referência.....	145
Figura 8-29 – Permeabilidade magnética obtida nos dois sistemas ....	147
Figura 8-30 – Verificação da repetibilidade da amostra do Inmetro em 1,5T/60Hz.....	148
Figura 8-31 - Verificação da repetibilidade do material de referência no SDMA em 1,5T/60Hz.....	148
 Figura C - 1 – Diagrama funcional da fonte CA .....	 169
 Figura E - 1 – Mesa de ensaio do SAMA.....	 175
Figura E - 2 – Detalhe do painel de comando .....	175



## LISTA DE QUADROS

Quadro 4-1 – Nomenclatura uniformizada para os aços elétricos.....	60
Quadro 5-1 – Variações nos textos normativos.....	82
Quadro 6-1 – Fatores de conversão de escala para o wattímetro .....	100
Quadro 6-2 – Percentual das perdas por Histerese e Foucault .....	101
Quadro 6-3 – Valores de $K$ .....	102
Quadro 7-1 – Amostras utilizadas na validação dos ensaios.....	118
Quadro 7-2 – Tolerâncias admitidas na validação dos resultados.....	119
 Quadro D - 1 – Resistência interna dos instrumentos em função da escala de medição.....	 173
 Quadro E - 1 – Valores de $K$ para os indutores de 1 A e 10 A.....	 177



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 8-1 – Perdas no ferro medidas para a amostra A1 .....	130
Tabela 8-2 – Perdas no ferro medidas para a amostra A2 .....	131
Tabela 8-3 – Perdas no ferro medidas para a amostra A3 .....	133
Tabela 8-4 – Perdas no ferro medidas para a amostra A4 .....	137
Tabela 8-5 – Perdas no ferro medidas para a amostra A5 .....	137
Tabela 8-6 – Perdas no ferro medidas para a amostra A6 .....	141
Tabela 8-7 – Perdas no ferro medidas para a amostra A7 .....	141
Tabela 8-8 – Perdas no ferro medidas para a amostra A8 .....	144
Tabela 8-9 – Permeabilidade magnética medida .....	146



## LISTA DE ABREVIATURAS

%Al	Percentual de alumínio
%Si	Percentual de silício
1006 MD:	Aço carbono 1006 com estrutura modificada
A/D	Analógico / Digital
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	Analog Digital Converter (Conversor analógico digital)
D/A	Digital / Analógico
DC	Direct Current (Corrente contínua)
EIW	Escala de corrente do wattímetro
EVW	Escala de tensão do wattímetro
FEM	Finite Element Method (Método de Elementos Finitos)
FF	Fator de Forma
FMI	Fator de Multiplicação do Instrumento
FPB	Filtro Passa Baixa
GRUCAD	Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.
JIS	Japanese Industrial Standard (Norma Industrial Japonesa)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PAR	Sentido paralelo ao sentido de laminação
PC	Personal Computer (Computador Pessoal)
PCP:	Planejamento e Controle de Produção
PER	Sentido perpendicular ao sentido de laminação
RI	Registro de Inspeção
SAMA	Sistema Analógico em Malha Aberta
SDMA	Sistema Digital em Malha Aberta
SP:	Semi-processada
SST	Single Strip Tester ou Single Sheet Tester (Ensaio em Chapa Única)
TG:	Tamanho de Grão
TP:	Totalmente Processada
TT:	Tratamento Térmico





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	30
1.2	MOTIVAÇÃO .....	31
1.3	OBJETIVO GERAL.....	32
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>33</b>
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	33
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>PERDAS DE POTÊNCIA NOS MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO .....</b>	<b>41</b>
3.1	PERDAS ELÉTRICAS .....	41
3.2	PERDAS ROTACIONAIS.....	41
3.3	SEPARAÇÃO DE PERDAS NOS MOTORES DE INDUÇÃO ...	42
<b>4</b>	<b>AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS.....</b>	<b>53</b>
4.1	BREVE HISTÓRICO.....	53
4.2	MATERIAL ESPECÍFICO E DIFERENCIADO .....	54
<b>4.2.1</b>	<b>Noções de Perdas de Origem Magnéticas.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Laço de Histerese.....</b>	<b>56</b>
4.3	ASPECTOS MECÂNICOS, QUÍMICOS E MAGNÉTICOS.....	58
<b>4.3.1</b>	<b>Propriedades Mecânicas .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Características Mecânicas .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Composição Química .....</b>	<b>59</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Propriedades Magnéticas.....</b>	<b>59</b>
4.4	NOMENCLATURA .....	59
4.5	CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS ELÉTRICOS.....	60
<b>4.5.1</b>	<b>Quanto à Estrutura Física .....</b>	<b>60</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Quanto ao Processo de Fabricação .....</b>	<b>61</b>
4.6	PROCESSAMENTO DOS AÇOS .....	63
<b>4.6.1</b>	<b>Processo de Corte da Bobina Mãe.....</b>	<b>63</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Processo de Puncionamento.....</b>	<b>63</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Processo de Corte a Laser.....</b>	<b>64</b>
<b>4.6.4</b>	<b>Processo de Estampagem.....</b>	<b>64</b>
4.7	TRATAMENTO TÉRMICO E ALÍVIO DE TENSÕES .....	66
<b>4.7.1</b>	<b>Recristalização.....</b>	<b>66</b>
<b>4.7.2</b>	<b>Crescimento de Grão.....</b>	<b>66</b>
4.8	O AÇO IDEAL PARA FABRICANTES DE MOTORES ELÉTRICOS.....	68
<b>4.8.1</b>	<b>Características Eletromagnéticas.....</b>	<b>69</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Características Mecânicas .....</b>	<b>69</b>
<b>4.8.3</b>	<b>Composição Química .....</b>	<b>70</b>
4.9	PERDAS MAGNÉTICAS NOS AÇOS ELÉTRICOS .....	72

4.9.1	Perda magnética por Correntes de Foucault .....	73
4.9.2	Perda Magnética devido ao Fenômeno de Histerese .....	78
4.9.3	Perda Anômala, Excedente ou Residual.....	80
5	<b>ASPECTOS NORMATIVOS DOS ENSAIOS .....</b>	<b>81</b>
5.1	A NORMA BRASILEIRA (NBR 5161) .....	84
5.1.1	Instrumentação.....	84
5.1.2	Quadro de Epstein.....	85
5.1.3	Corpo de Prova.....	87
5.1.4	Cálculo das Perdas .....	88
5.1.5	Separação das Perda Totais em Estáticas e Dinâmicas.....	89
5.1.6	Curva de Magnetização .....	90
5.1.7	Método da Indutância Mútua .....	91
5.1.8	Cálculo da Permeabilidade.....	92
6	<b>DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....</b>	<b>93</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	93
6.1.1	Etapa 1: Inspeção Visual .....	93
6.1.2	Etapa 2: Análise Laboratorial.....	93
6.1.3	Etapa 3: Desmagnetização da Amostra .....	93
6.1.4	Etapa 4: Caracterização de Materiais Magnéticos.....	94
6.2	SISTEMA ANALÓGICO EM MALHA ABERTA (SAMA).....	94
6.2.1	Características Principais.....	94
6.2.2	Especificação da Fonte de Alimentação .....	95
6.2.3	Diagrama de Blocos.....	96
6.2.4	Esquema de Ligação .....	97
6.2.5	Procedimento de Ensaio.....	98
6.2.6	Medição das Perdas.....	99
6.2.7	Determinação da Curva de Magnetização e Permeabilidade Magnética	101
6.3	SISTEMA DIGITAL EM MALHA ABERTA (SDMA) .....	102
6.3.1	Características Principais.....	103
6.3.2	Especificações da Fonte .....	103
6.3.3	Diagrama de Blocos.....	104
6.3.4	Esquema de Ligação .....	105
6.3.5	Procedimento de Ensaio.....	107
6.3.6	Medição das Perdas.....	108
6.4	SISTEMA DIGITAL EM MALHA FECHADA (SDMF).....	113
6.4.1	Características do Sistema.....	113
6.4.2	Especificação da Fonte.....	114
6.4.3	Diagrama de Blocos.....	115
6.4.4	Procedimento de Ensaio.....	115
6.4.5	Medição das Perdas.....	116
6.5	BANCO DE DADOS DE AÇOS ELÉTRICOS.....	116
7	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>117</b>
7.1	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	117

<b>8</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>123</b>
8.1	DESEMPENHO DO SISTEMA .....	123
8.2	PERDAS TOTAIS MEDIDAS .....	123
8.3	SEPARAÇÃO DE PERDAS.....	127
8.4	PERMEABILIDADE MAGNÉTICA .....	145
8.5	A REPETIBILIDADE NO SDMA.....	147
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>149</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>153</b>
	<b>GLOSSÁRIO .....</b>	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE A – Procedimento analítico para o cálculo da separação de perdas segundo a NBR 5161.....</b>	<b>161</b>
	<b>APÊNDICE B – Análise das expressões de <math>k_1</math> e <math>k_2</math> .....</b>	<b>165</b>
	<b>APÊNDICE C - Diagrama funcional da fonte de alimentação do SDMA .....</b>	<b>167</b>
	<b>APÊNDICE D – Procedimento para ensaio de perdas em quadro de Epstein para o SAMA .....</b>	<b>171</b>
	<b>APÊNDICE E - Determinação das curvas de Magnetização (<math>B \times H</math>) e Permeabilidade (<math>\mu \times H</math>) no SAMA.....</b>	<b>175</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A caracterização de materiais magnéticos é de extrema relevância para a indústria de energia, uma vez que possibilita o controle e a manutenção da qualidade da matéria prima utilizada na fabricação de geradores, motores e transformadores. A caracterização de materiais também fornece informações necessárias para a busca contínua da melhoria dos índices da qualidade às áreas de apoio, pesquisa, desenvolvimento, suprimentos, processos, controle de qualidade. Informações coletadas ao longo do tempo servem como histórico e referência ao aprimoramento dos produtos existentes bem como ao desenvolvimento de soluções inovadoras no ramo da conversão eletromecânica de energia.

Acompanhando as tendências de um mercado globalizado, na busca da melhoria contínua, torna-se imprescindível um sistema de caracterização de materiais magnéticos automático, moderno, ágil, com alto padrão de qualidade e que atenda a normalização vigente.

Este trabalho foi concebido com o intuito de desenvolver uma bancada que atendesse a demanda de ensaios de rotina de chapas de aço para fins elétricos, aliando a este objetivo principal mais rapidez e confiabilidade nos resultados das medições. O sistema está em operação em uma empresa catarinense, atendendo à demanda solicitada, substituindo com vantagens o sistema que vinha sendo até então utilizado.

No decorrer desta dissertação são apresentados os resultados obtidos na modernização de uma bancada de ensaio para a caracterização de aços elétricos, desde a concepção até a sua implementação. Serão abordadas as vantagens e desvantagens de três topologias de sistema para a caracterização de materiais magnéticos. Um sistema analógico e outro digital, ambos com controle em malha aberta e um sistema digital comercial, com controle em malha fechada. Serão discutidas algumas soluções apresentadas na bibliografia para sistemas automatizados, que utilizam características especiais de alimentação com imposição da forma de onda de tensão induzida e controle em malha fechada.

Também são abordadas as razões que foram levantadas e que justificavam uma automatização do sistema de medição, transformando-o de um sistema analógico para um sistema digital, ainda mantendo o controle em malha aberta. Também serão discutidas as facilidades e dificuldades encontradas na concepção, montagem e ensaios de calibração.

Dedicação especial foi dada ao processo de validação do sistema automatizado, pela análise dos resultados, tomando como referência um sistema comercial que, devido às suas características, é considerado hoje uma referência internacional na caracterização de aços elétricos. Um sistema comercial desse porte possui características próprias, tanto no que se refere ao processo de controle do ensaio propriamente dito, quanto nas particularidades de aquisição, tratamento de dados e rotinas de cálculo. No que se refere ao cálculo da separação de perdas, adotou-se o cálculo normativo indicado na norma brasileira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) que utiliza os valores das perdas totais para a obtenção das perdas dinâmicas e estáticas. Dessa forma, tem-se um procedimento independente para o cálculo das grandezas de interesse ao mesmo tempo em que é possível comparar resultados obtidos em sistemas diferentes.

Finalmente são apresentadas a implementação, a validação e as conclusões pertinentes ao desenvolvimento do sistema automatizado, bem como sugestões para a melhoria de performance no processo de alimentação do quadro, aquisição de sinais e tratamento de dados.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda das áreas fabris exige diariamente uma maior agilidade nas informações, respostas e análises solicitadas aos laboratórios de testes e ensaios. Esta característica se acentua principalmente em se tratando do controle de qualidade dos materiais existentes e na avaliação de novos materiais. Em empresas com processos de produção dinâmicos, essas informações, quando disponíveis em tempo hábil, podem ser utilizadas na adequação de uma manufatura especial e personalizada, mantendo a qualidade garantida do produto. A busca pela melhoria contínua implica no aperfeiçoamento e otimização de processos bem como a garantia da qualidade da matéria prima.

Para a caracterização dos materiais magnéticos, mais precisamente aços para fins elétricos, é usual empresas utilizarem, pelos setores de controle de qualidade, um sistema de medição manual, analógico e com controle em malha aberta. Geralmente, as bancadas de ensaio atendem basicamente a dois tipos de ensaio: um considerado completo, em que se medem as perdas em frequências pré-estabelecidas e realiza-se o levantamento da curva de magnetização do material, e outro ensaio, considerado simplificado ou de rotina, no qual são medidos os valores das perdas nas induções de 1,0 T e 1,5 T, nas

frequências de 50 Hz e 60 Hz e faz-se o levantamento de alguns pontos da curva de magnetização a fim de se calcular a permeabilidade do material ensaiado.

O tempo necessário para a realização de um ensaio completo é de aproximadamente 60 minutos e para o simplificado em torno de 20 minutos, quando realizado por um laboratorista treinado na operação do sistema e na leitura dos instrumentos de medição. A análise, discussão, liberação dos resultados e montagem de relatório final com as conclusões e observações, caso fossem necessárias, era atribuição do corpo técnico responsável pelos ensaios de caracterização.

Devido ao crescimento da demanda, a quantidade de ensaios de rotina tem aumentado, bem como a utilização dos equipamentos para avaliação de pesquisas sobre o comportamento das amostras no que se refere aos processos de tratamento térmico, alívio de tensões e crescimento de grão, visando a otimização do tempo de forno. Houve um aumento considerável na quantidade de ensaios de rotina, completo, de desenvolvimento de novos fornecedores mundiais e de pesquisas de materiais alternativos que atendessem aos limites normalizados tanto das características elétricas como mecânicas.

Nesse contexto, desenha-se a necessidade de se otimizar a utilização do equipamento de caracterização de materiais magnéticos para atender à crescente demanda de ensaios, testes e análises diferenciadas.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A facilidade e a rapidez existentes nos dias de hoje para a troca de informações aliado à globalização no que tange à contratação de bens e serviços, possibilitaram a compra e utilização de matéria prima e insumos de qualquer parte do mundo. Dentro da realidade industrial, no que tange ao universo dos aços elétricos, diariamente se está diante do desafio de testar e avaliar fornecedores mundiais em busca do melhor equilíbrio para o binômio custo/benefício. A crise mundial de aço para fins elétricos em 2004/2005 acelerou a necessidade do desenvolvimento de novos fornecedores a nível global. Grandes investimentos foram realizados pelas aciarias na modernização de seus parques fabris, a fim de aproveitar o reaquecimento da economia e suprir a crescente demanda por produtos de melhor qualidade. Neste contexto econômico, as empresas também adequaram processos de compra, testes e aprovação de matéria prima, agilizando setores de suprimento, modernizando processos laboratoriais de medição e análise acelerando a

avaliação e liberação dos resultados. Desta maneira, os setores de suprimentos podem tomar decisões estratégicas, mantendo simultaneamente os níveis exigidos pelos programas de qualidade.

O desenvolvimento de uma bancada automática para a caracterização de materiais magnéticos, que atendessem a normalização vigente no mercado brasileiro, acelerando a realização dos ensaios de caracterização de materiais magnéticos com precisão, qualidade e repetibilidade, contribuindo para a melhor utilização do tempo dos laboratoristas foram alguns dos fatores que nos motivaram na realização do presente trabalho.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Esta dissertação tem como objetivo geral o desenvolvimento, implementação e validação de um sistema moderno, confiável e rápido que seja capaz de realizar a caracterização de materiais magnéticos para fins elétricos. Por caracterização de materiais magnéticos, entende-se a realização do ensaio de Epstein, segundo a norma brasileira NBR 5161 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977), realizado em amostras de aço padronizadas, com a medição das perdas elétricas, capacidade de amplificação do campo magnético (permeabilidade) e a resposta do material, em termos de campo magnético e indução magnética, quando submetido a um regime de tensão e corrente conhecidos na faixa de interesse.

Para esta sistemática de medição foi desenvolvida uma bancada de ensaio que utiliza um dispositivo comercial normalizado chamado quadro de Epstein.

Para a validação do sistema de caracterização foram segregadas amostras de diferentes classes de materiais e comparados os valores medidos em ensaios realizados em outros dois equipamentos, diferentes tanto na estrutura como na concepção. Outro critério foi a avaliação da repetibilidade dos resultados, garantindo uma correta avaliação das características intrínsecas do material.

Aproveitando a característica da automatização do ensaio, ou seja, a medição automática das grandezas de interesse, foi concebido um banco de dados para os valores medidos, a fim de dinamizar a análise e liberação dos materiais. Outro recurso do banco de dados é a facilidade de acesso ao histórico dos materiais já ensaiados e a geração de relatórios de ensaio tanto para clientes internos quanto para externos.



### 1.3.1 Objetivos Específicos

Utilizar a oportunidade de participar do desenvolvimento de um projeto dessa monta propiciou a elaboração deste trabalho que, além dos objetivos gerais, em função de suas características próprias, permitiu estabelecer como objetivos específicos:

- Aprimorar os conhecimentos do universo dos aços para fins elétricos, investigando seu comportamento em diversas condições de ensaio, nas baixas e altas induções e campos magnéticos com amplitudes variadas;
- Participar de todas as etapas de um processo de automatização de um sistema de medição, em termos de elaboração do cronograma do projeto, planejamento das etapas de execução, cotação e avaliação de serviços e equipamentos, projeto e discussões técnicas relacionadas ao desenvolvimento das soluções para cada etapa proposta;
- Interagir com diferentes áreas da empresa, como por exemplo metrologia, tecnologia do produto, laboratórios de ensaios, suprimentos e as equipes de analistas e especialistas de cada setor;
- Desenvolver a capacidade de interagir com as diversas áreas, coordenando o uso de equipamentos e recursos humanos das áreas envolvidas, conforme a necessidade e urgência, para um melhor andamento do trabalho;
- Incentivar a integração da indústria com as instituições de ensino de nível superior por meio da troca de informações, serviços e trabalhos em conjunto, complementando as eventuais necessidades que forem surgindo na medida do andamento das atividades oriundas deste trabalho, foram alguns dos objetivos específicos quando da realização deste trabalho.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho aborda a automatização de um ensaio padronizado para a caracterização de aços, mais precisamente os aços para fins elétricos. Sendo assim, no capítulo dois faz-se uma revisão bibliográfica dos tipos dos métodos para a caracterização de materiais magnéticos. Procura-se apresentar o contexto das perdas de potência de uma forma

geral, nos motores elétricos de indução (capítulo três). Na sequência dedica-se o capítulo quatro para os aços para fins elétricos, onde são abordados temas relativos aos aços industriais, processamento e tipos de aços, qual o aço ideal para os fabricantes de motores elétricos e as perdas de origem magnética. Por tratar-se de um ensaio normalizado, o capítulo cinco é dedicado à norma brasileira. No capítulo seis é realizada a descrição dos sistemas trabalhados. Os materiais e métodos utilizados são abordados no capítulo sete. Nos demais capítulos são apresentados os resultados do procedimento de validação da bancada (capítulo oito) e as conclusões do trabalho (capítulo nove).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A caracterização de materiais magnéticos realizado pelos fabricantes de máquinas elétricas, tem como objetivos principais estabelecer os parâmetros necessários, à seção de suprimentos, para realizar o controle de qualidade dos materiais, e fornecer uma referência de desempenho para as áreas de engenharia.

Sistemas automáticos para a caracterização de materiais magnéticos foram desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo do tempo. Inicialmente focados na alimentação senoidal como forma de validação dos resultados do método, foram evoluindo para a alimentação com forma de onda quadrada e posteriormente para formas de onda diversas.

Com o avanço da microeletrônica os experimentos com a aquisição de sinais tornaram-se confiáveis a ponto de se tornarem praticamente essenciais nos equipamentos atuais no que diz respeito à aquisição, controle e tratamento de sinais.

A eletrônica digital distribuída foi substituída por sistemas dedicados compactos e otimizados, agregando ganhos de performance e confiabilidade na aquisição e tratamento das grandezas de interesse.

Novas técnicas de controle e processamento de sinais permitiram uma melhor observação e análise dos fenômenos que envolvem a caracterização de materiais magnéticos, refletindo na qualidade dos resultados obtidos.

Sensores com alta resolução e velocidade de amostragem, placas de aquisição de sinais com frequência de operação elevada e *softwares* dedicados para o projeto de sistemas, são ofertados a custos acessíveis e paulatinamente estão substituindo os wattímetros na medição das perdas.

As fontes de alimentação também evoluíram, passando da alimentação senoidal diretamente da rede elétrica, fixa em 50 ou 60 Hz para os grupos geradores com controle de amplitude e frequência. Nos laboratórios, institutos de pesquisa e principalmente nos meios acadêmicos, pode-se encontrar como fonte de alimentação uma associação de gerador de funções e amplificadores de potência. Esta configuração depende das características do gerador de funções, que pode ser um equipamento físico dedicado com operação local ou remota via *software* de controle. Depende também do tamanho da banda do amplificador de potência, que permite a reprodução de sinais com certo conteúdo harmônico, e da fidelidade na amplificação dos sinais desejados (AMAR e PROTAT, 1994).

Fontes eletrônicas com geração de sinais senoidais oriundos do sinal PWM, bem como inversores de frequência também são empregados com o intuito de simular as formas de onda utilizadas nas máquinas elétricas girantes. Sistemas de medição que necessitam controle sobre todos os sinais aplicados utilizam inversores de frequência modificados para viabilizar o ajuste independente do índice de modulação e amplitude da componente fundamental da tensão de saída. Nesses sistemas a tensão do barramento CC pode ser livremente alterada (TORRES, 2002).

Atualmente existem fontes eletrônicas com injeção controlada de conteúdo harmônicos por fase o que permite um estudo mais apurado do comportamento dos aços quando submetidos a regimes específicos de indução (JUNIOR, 2010).

A utilização de Instrumentos Virtuais (VIs) nas interfaces de aquisição, processamento, controle, apresentação de resultados e armazenamento de dados (BATISTELA, 2001; JUNIOR, 2010), é uma prática que se desenvolveu aproveitando a capacidade dos computadores pessoais aliado aos equipamentos de medição digitais (ZRUDSKY e PICHLER, 1992). Equipamentos como osciloscópios digitais, analisadores de potência, sensores de temperatura possuem portas de comunicação que podem ser acessadas remotamente, facilitando o controle e operação dos dispositivos via *software* dedicado.

O *software* LabView<sup>1</sup>, utilizado para a criação e gerenciamento de VIs é amplamente difundido (ZRUDSKY e PICHLER, 1992; BATISTELA, 2001; JUNIOR, 2010) devido à sua praticidade de programação em ambiente gráfico e a interoperabilidade com as placas de aquisição de dados.

A consolidação dessa plataforma de trabalho se deu ao longo do tempo, Zrudsky e Pichler, (1992) desenvolveram um *software* específico baseado no conceito de VIs (NATIONAL INSTRUMENTS, 1996) para o desenvolvimento da plataforma de aquisição de dados, análise e apresentação dos dados medidos, controle dos instrumentos, controle de processo e apresentação dos dados de saída. A comunicação do computador com os instrumentos ocorreu via GPIB interface (IEEE 488). Solução já consolidada nas mais diversas aplicações, é empregada em larga escala na digitalização de dados e consequente pós-processamento.

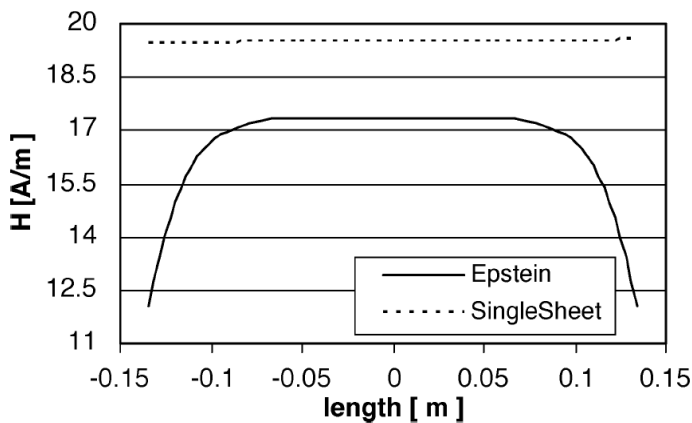
---

<sup>1</sup> *Software* de propriedade da National Instruments.

Além do quadro de Epstein, utilizam-se para a caracterização de materiais magnéticos, um dispositivo conhecido como Single Sheet Tester (SST) e transformadores toroidais. Uma comparação de ensaios entre esses dispositivos foi realizada por (MEURER, GARCIA, *et al.*, 2004). Embora os autores não definam um melhor método para análise do comportamento do material visando a utilização dos dados para o projeto de máquinas elétricas rotativas, a metodologia adotada indica que os valores das perdas em [W/kg] encontrados nas medições no quadro de Epstein foram muito próximos uns dos outros. No SST foram encontrados valores de perdas inferiores nas lâminas L (longitudinal) em relação às lâminas T (transversal) e D (diagonal). Nos transformadores os valores de perdas medidos foram semelhantes. Embora os sistemas referenciados sejam para a caracterização de materiais magnéticos, todos apresentam vantagens e desvantagens desde a preparação das amostras até a efetiva medição das perdas. A realização dos ensaios seguiu as recomendações normativas para cada caracterização. Foi utilizado o sistema comercial MPG 100 D fornecido pela Brockhaus Messtechnik, de propriedade do Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) da Universidade Federal de Santa Catarina.

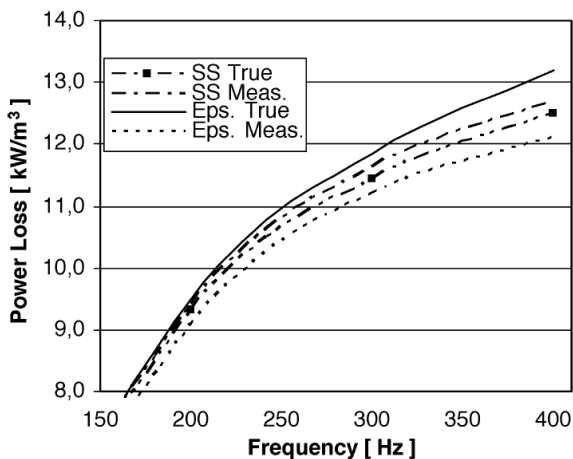
Em (ANTONELLI, CARDELLI e FABIA, 2005) foi realizada uma comparação entre dos valores de perdas, no domínio do tempo e da frequência, medidos pelo sistema de Epstein, o SST e o método de elementos finitos tridimensional (3-D FEM). Os autores apontam para algumas desvantagens do sistema de Epstein, que embora aceito mundialmente como padrão internacional para a realização da caracterização magnética de aços elétricos, não leva em consideração a anisotropia do material e os efeitos dos cantos no ensaio de perdas. Utilizando o 3-D FEM como referência, foi apontado o SST como o instrumento que apresentou a melhor acuracidade nos resultados encontrados. Uma das causas das diferenças apresentadas nos resultados medidos foi atribuída à variação dos valores de B e H no material magnético sob teste ao longo do caminho das linhas de fluxo (Figura 2-1). Esta não uniformidade da distribuição afeta não somente os dados medidos nas altas frequências na análise AC, mas também os valores da curva B(H) obtida em DC. Embora exista similaridade no formato das curvas, existe diferença significativa nos valores apresentados pelos dois sistemas. (Figura 2-2 e Figura 2-3).

Figura 2-1 – Ensaio de Epstein versus Ensaio em Chapa Única região sob o enrolamento com campo magnético de 20 A/m.



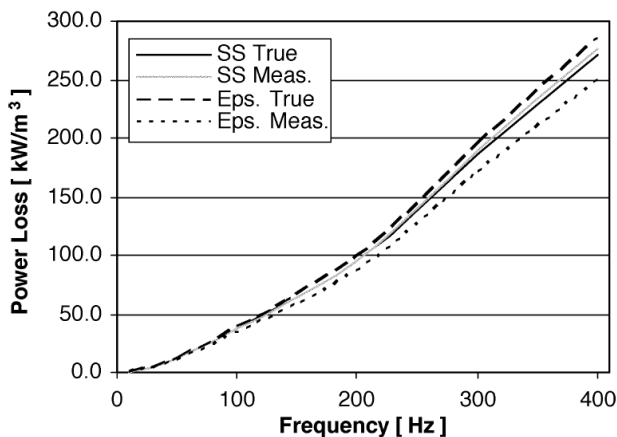
Fonte: Antonelli, Cardelli e Faba, (2005).

Figura 2-2 - Perdas por correntes induzidas com variação de frequência para campo magnético de 20 A/m.



Fonte: Antonelli, Cardelli e Faba, (2005).

Figura 2-3 - Perdas não lineares no domínio do tempo com campo magnético máximo ( $H_m$ ) de 189.2 A/m.



Fonte: Antonelli, Cardelli e Faba, (2005).

No que concerne ao uso dos resultados da caracterização de materiais magnéticos, utilizando tiras de aço, para dar suporte às áreas de engenharia de máquinas, os autores são unânimes em afirmar que para o projeto de transformadores os dados fornecidos pelo quadro de Epstein são úteis em função da similaridade construtiva dos dispositivos. Entretanto, em se tratando de máquinas elétricas girantes essas informações são discrepantes (MTHOMBENI, PILLAY e STRNAT, 2007).

O fluxo rotacional presente no material magnético das máquinas elétricas girantes causam perdas no ferro. Projetistas de máquinas usam as perdas obtidas nos ensaios de Epstein para estimar o comportamento das perdas no ferro quando o material é submetido a uma intensidade de fluxo variante no tempo. O ensaio normalizado não está apto a considerar as perdas rotacionais, portanto observa-se uma variação nos percentuais encontrados, quando se compara os resultados de Epstein com as perdas medidas nos ensaios da máquina (STRANGES e FINDLAY, 1994; TORRES, 2002).

Uma forma de contornar este problema, adotada pelos projetistas de máquinas, é a utilização de fatores empíricos obtidos na prática para a correção das perdas (BERTOTTI *et al.*, 1991; STRANGES e FINDLAY, 1994).

Assumindo uma distribuição senoidal do fluxo no entreferro de um motor de indução trifásico, 7.5 kW, 220/380 V, IV polos, ranhura do rotor fechada e comparando os valores obtidos com simulações por elementos finitos 2D e as curvas de Epstein (BERTOTTI, *et al.*, 1991) encontrou discrepâncias nos valores encontrado sendo que os valores obtidos nos modelos eram inferiores aos medidos na prática. Nas frequências nominais de 50/60 Hz as diferenças giraram em torno de 25-50%, para frequências mais elevadas esses valores subiram para 60-75%. Para o motor estudado, na frequência nominal a diferença encontrada foi de 30%. Algumas das razões apresentadas, pelos autores, para esta diferença nos valores medidos foram: as diferenças nas geometrias comparadas, as condições de ensaio no Epstein, as harmônicas na forma de onda do fluxo durante a saturação do ferro, a modificação das propriedades magnéticas do material ferromagnético devido à força aplicada no processo de estampagem e montagem do pacote e a incerteza na medição das perdas em induções acima de 1,8 T.

Com o intuito de minimizar essas diferenças entre valores medidos em quadro de Epstein e valores obtidos no produto final, Torres (2002) desenvolveu um ensaio de Epstein diferenciado tanto no sistema de alimentação do quadro quanto na elaboração das amostras. No ensaio, denominado teste de Epstein generalizado, é utilizado alimentação por inversor de frequência, contemplando os efeitos de harmônicos espaciais com alimentação não senoidal e amostras preparadas segundo metodologia própria com o intuito de contemplar a tensão de corte e anisotropia do material sob teste. Apesar dos resultados apontarem um crescimento no valor das perdas, quando comparado com o ensaio de Epstein padrão, tem como desvantagens as dificuldades na preparação das amostras e a montagem física do ensaio com amostras não padronizadas.



### **3 PERDAS DE POTÊNCIA NOS MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO**

A previsão das perdas nas máquinas elétricas é de suma importância para que se tenha um projeto com desempenho aproximado ao de uma máquina real. A determinação das perdas nas máquinas elétricas é de grande interesse porque influencia o rendimento destes dispositivos, tornando-os mais ou menos competitivos nos mercados com crescente preocupação com o uso racional da energia elétrica.

Geralmente dividem-se as perdas nas máquinas em duas classes, a primeira refere-se as perdas magnéticas no ferro, também conhecida como perdas no núcleo, e as que são oriundas da circulação de corrente nos diversos enrolamentos da máquina, mais conhecida como perdas elétricas, perdas no cobre ou perdas no enrolamento. A segunda parcela de perdas, as que são função direta do movimento dinâmico da máquina, chamadas de perdas rotativas ou mecânicas, são geralmente agrupadas em perdas por atrito e ventilação. (KOSOW, 1995; FITZGERALD; KINGSLEY JR.; KUSCO, 1975).

#### **3.1 PERDAS ELÉTRICAS**

Segundo Kosow (1995) tecnicamente seria mais correto utilizar o termo perdas no “enrolamento” e não perdas no “cobre”, uma vez que, os enrolamentos do rotor e da armadura são ocasionalmente construídos de alumínio fundido. No presente trabalho, utilizaremos o termo “perdas no enrolamento” na acepção acima descrita.

#### **3.2 PERDAS ROTACIONAIS**

São as perdas que variam em função da velocidade, perdas mecânicas, basicamente atrito e ventilação, e as que são função da velocidade e do fluxo, chamadas perdas no núcleo. Estas últimas ocorrem quando uma estrutura de ferro experimenta um fluxo magnético variante no tempo. (KOSOW, 1995; FITZGERALD; KINGSLEY JR.; KUSCO, 1975) Embora a abordagem dos autores esteja correta, as perdas de origem magnética são usualmente classificadas como perdas elétricas. Nesse contexto é que elas serão referidas neste trabalho.

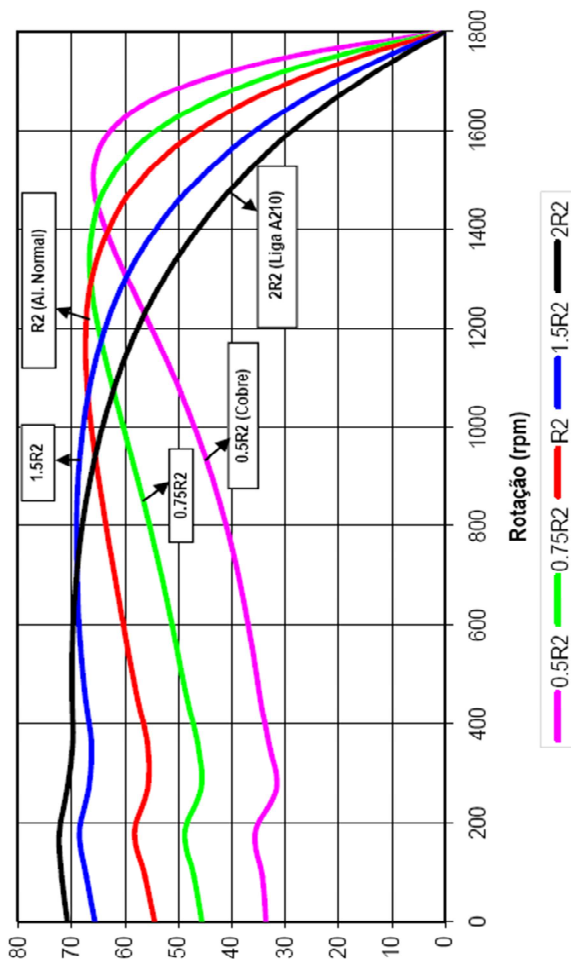
### 3.3 SEPARAÇÃO DE PERDAS NOS MOTORES DE INDUÇÃO

O estudo da segregação das perdas nos permite compreender o mecanismo da dissipação de potência nas máquinas elétricas, além de ser uma ferramenta útil para a classificação dos materiais magnéticos. Tendo o conhecimento prévio da contribuição de cada parcela, o projetista da máquina pode, por exemplo, selecionar o material ativo mais adequado à determinada aplicação levando em consideração a relação custo/benefício (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1976).

Na Figura 3-3 observa-se a representação da separação das perdas em motores de indução. É mostrado, no primeiro eixo das ordenadas, o percentual de participação das perdas em relação às perdas totais, no que se refere as parcelas de perdas mecânicas (*pmec*), perdas no ferro (*pfe*), perdas joule no estator (*pj1*), perdas joule no rotor (*pj2*) e as perdas suplementares (*ps*), no segundo eixo é apresentado o comportamento do rendimento [%] pela Potência [cv] que ocorrem em motores elétricos da linha Standard, 60 Hz, IV polos com potência variando de ¼ a 400 cv.

Enquanto as perdas mecânicas (*pmec*), compostas basicamente por atrito e ventilação, aumentam percentualmente nos motores de maior potência, em função do projeto e da quantidade de material do ventilador, as perdas joule no estator (*pj1*) diminuem percentualmente, devido ao incremento da seção transversal do enrolamento e à diminuição do número de condutores utilizados nos projetos de motores elétricos. As perdas joule no rotor (*pj2*) afetam diretamente o escorregamento a torque máximo (KRAUSE, 1996). Dessa forma, *pj2* depende basicamente da resistência do rotor, pelo tipo de liga de alumínio utilizada na estrutura da gaiola de esquilo ou na existência ou não de resistências externas ao rotor. Sendo assim, se todos os parâmetros da máquina forem mantidos constantes, é possível alterar a velocidade na qual ocorre o torque máximo em regime permanente.

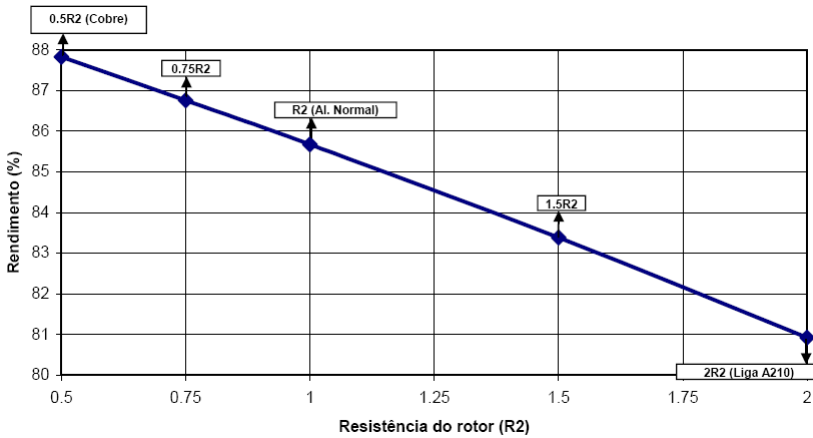
Figura 3-1 – Efeito da variação da resistência rotórica  
(Torque [Nm] x Rotação [rpm])



Fonte: Nau, Siguimoto e Carvalho, (2003)

Quanto maior for a resistência rotórica, maior a rapidez com que a curva de conjugado atinge o torque máximo, entretanto o rendimento da máquina fica comprometido conforme pode ser observado na ... que correlaciona o rendimento com a resistência rotórica.

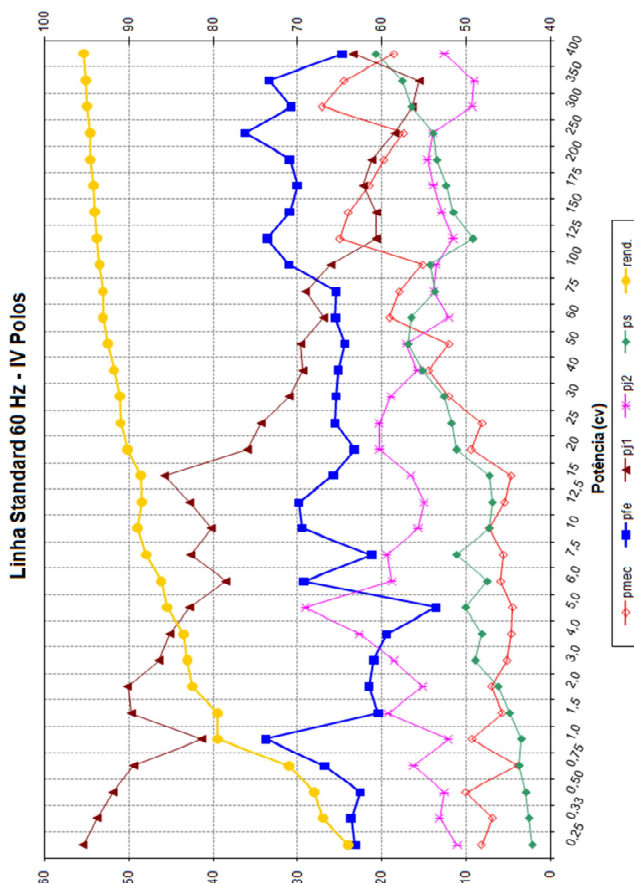
Figura 3-2 – Variação do rendimento em função da resistência rotórica  
(Rendimento (%) x Resistência rotórica)



Fonte: Nau, Siguimoto e Carvalho, (2003)

No que tange às perdas suplementares ( $p_s$ ) observa-se um progressivo aumento na medida em que cresce a potência das máquinas (Figura 3-3). Essas perdas são compostas pelas parcelas das perdas por pulsação e pelas perdas superficiais. As primeiras são provocadas pelas pulsações longitudinais do fluxo magnético como resultado da variação da permeância, condicionada pela variação contínua da posição mútua entre os dentes do estator e do rotor quando este está em movimento. As últimas estão relacionadas à não uniformidade da distribuição da onda de indução no entreferro, devido a influência das ranhuras (KOSTENKO; PIOTROVSKI, 1976). Na Figura 3-3 observa-se a evolução do rendimento das máquinas com o aumento da potência, os valores de rendimento estão expressos no segundo eixo das ordenadas.,

Figura 3-3 – Separação de perdas em motores de indução padrão



Fonte: Pacheco (2001)

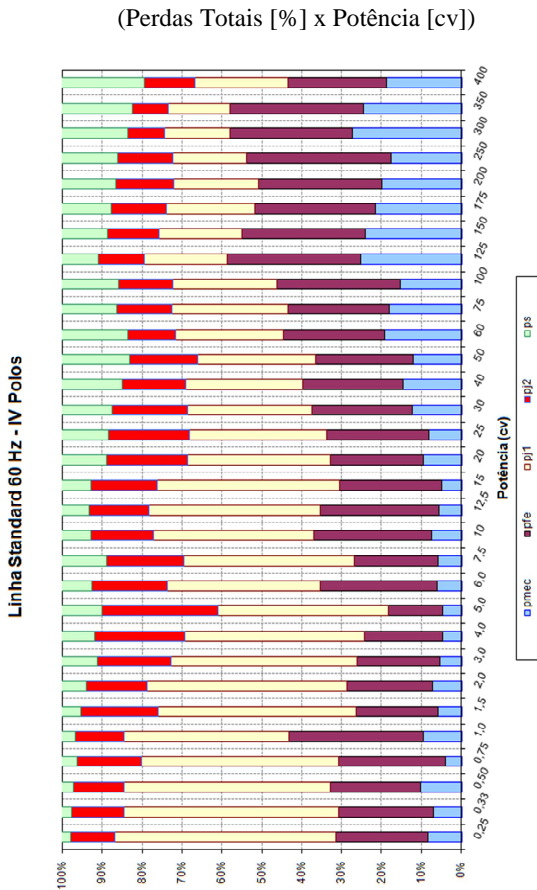
As perdas no ferro possuem um comportamento homogêneo, com variações pontuais, quando se compara a variação de potência de 1/4 a 400 cv. Estas variações pontuais podem ser devido às características do projeto, bem como ao tipo de material ativo (aço) que foi utilizado.

A tendência do aumento das perdas mecânicas, assim como a redução das perdas joule no estator, no tocante às perdas totais, pode ser observada na Figura 3-4.

No que diz respeito às perdas no ferro, observa-se que seu valor oscila basicamente entre 20 a 30% das perdas totais do motor, independentemente da potência e do tamanho da máquina. O comportamento

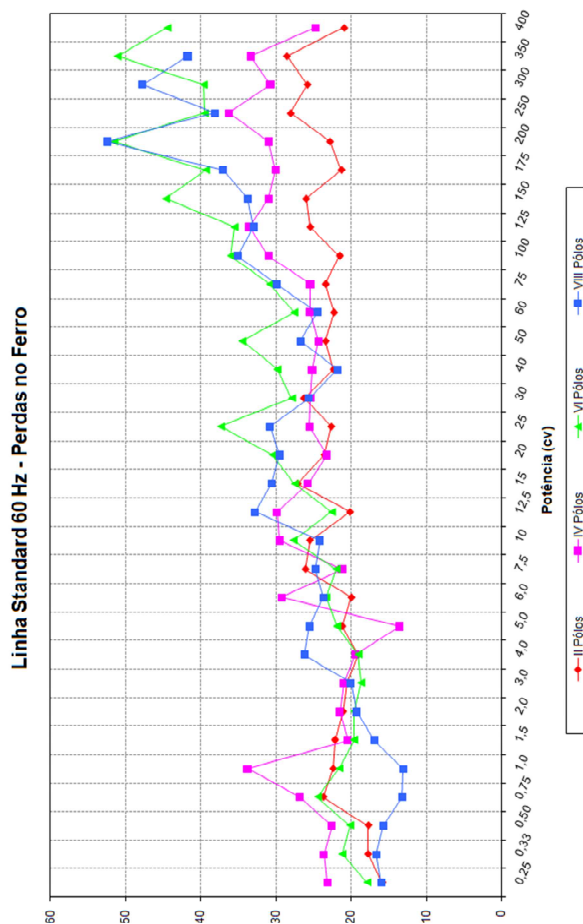
dessas perdas para motores com II, VI e VIII polos apresenta uma tendência análoga ao comportamento em motores IV polos (Figura 3-5), isto se deve ao fato de que as perdas no ferro estão diretamente relacionadas ao material ativo e aos níveis de indução de saturação da máquina. Sendo assim, motores de diferentes polaridades e mesma carcaça possuem praticamente o mesmo material ativo (quanto maior a polaridade, menor a coroa) e critérios de projeto limitam a utilização da chapa em altas induções.

Figura 3-4 – Contribuição das parcelas individuais de perdas nas perdas totais da máquina



Fonte: Pacheco (2001)

Figura 3-5 – Perdas no ferro [%] x Potência [cv] nos motores de indução para diferentes polaridades



Fonte: Pacheco (2001)

As perdas joule [W] do estator podem ser calculadas por (3.1) uma vez que é possível medir os valores de corrente e resistência do enrolamento.

$$p_{j1} = I_1^2 R \quad (3.1)$$

Onde  $I_l$  é a corrente [A] que circula pelo enrolamento do estator, e  $R$  é a resistência [ $\Omega$ ] do condutor que compõe o enrolamento. A resistência do fio depende de parâmetros físicos, conforme (3.2), que podem ser determinados experimentalmente. Pode-se observar a relação inversa entre o valor da resistência do fio com sua seção transversal.

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (3.2)$$

Onde  $\rho$  é a resistividade do material [ $\Omega \text{ m}$ ],  $l$  e  $S$  o comprimento [m] e a seção transversal do fio [ $\text{m}^2$ ] respectivamente.

Por caracterização de aços elétricos entende-se o levantamento da curva de magnetização, a medição das perdas sob certos regimes de indução e a obtenção das características intrínsecas do material. Sob uma óptica mais ampla a caracterização pode englobar ainda o conhecimento das propriedades físicas, da composição química do material magnético e das variáveis metalúrgicas existentes na fabricação do aço. No escopo deste trabalho, estaremos nos referindo à caracterização do material magnético sob o enfoque das propriedades eletromagnéticas.

A textura dos aços totalmente processados é desenvolvida na usina siderúrgica, quando de sua fabricação, já os aços semiprocessados recebem passes de encruamento, com taxas que variam segundo as especificações do cliente, a fim de suprirem o material com a energia necessária, no recozimento final, para promover um crescimento de grão da ordem de 100 a 150  $\mu\text{m}$ . Segundo Landgraf; Akanohashi; Campos, ([19--]) são utilizados métodos essencialmente empíricos para o controle da textura, uma vez que, ainda são limitados os conhecimentos científicos acerca dos fenômenos micro estruturais e seus efeitos.

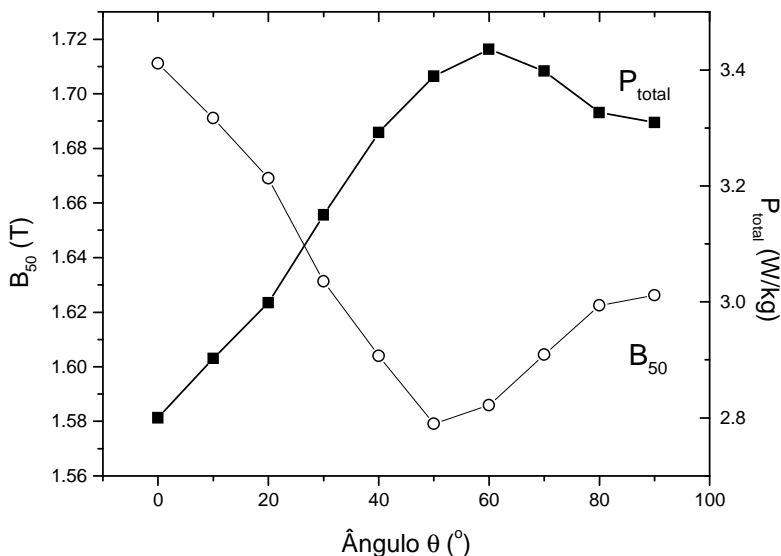
Uma das maneiras de se expressar a permeabilidade é a avaliação do  $B_{50}$ , parâmetro que representa o valor da indução magnética quando o material é submetido a um campo magnético de 50 A/cm e que depende quase que unicamente da textura. Fabricantes de máquinas elétricas tem pressionado as siderúrgicas para desenvolver aços mais eficientes, com propriedades magnéticas melhoradas. No final do século XX foram realizados importantes avanços no condicionamento da textura dos aços (LANDGRAF; AKANOHASHI; CAMPOS, [19--]).

A Figura 3-6 apresenta o efeito do ângulo de corte nas perdas a 1,5T, 60 Hz e na indução  $B_{50}$  para um aço com 3% de Si (LANDGRAF *et al.*, 2001). Embora a Associação Brasileira de Normas Técnicas



(1977) sugira que se realize a caracterização dos aços com amostras mistas, ou seja, 50% das lâminas da amostras cortadas no sentido longitudinal ao sentido de laminação e 50% cortadas no sentido transversal, nota-se uma elevação das perdas em 60° de inclinação.

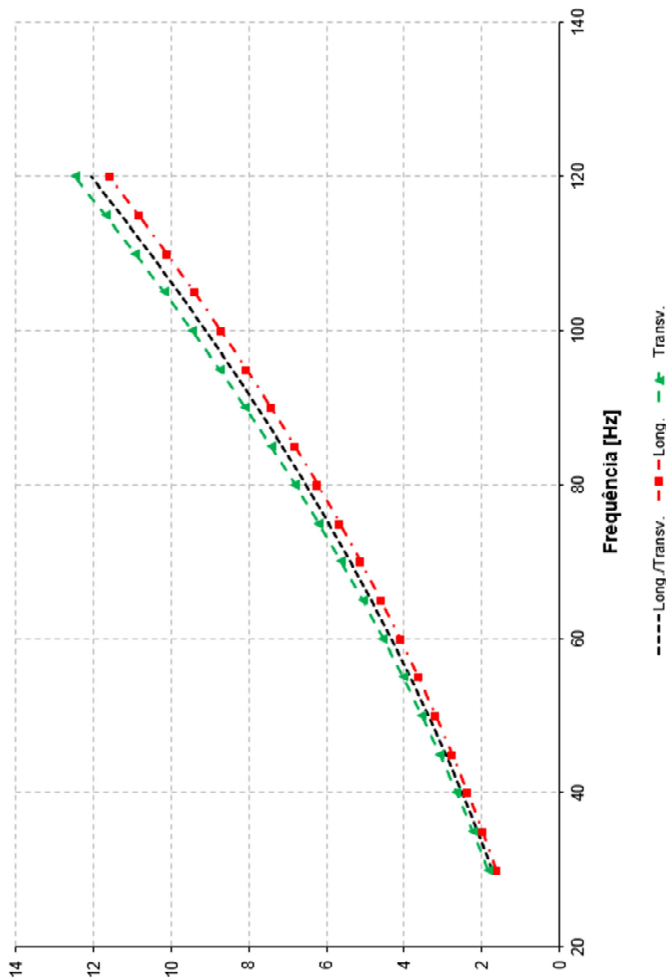
Figura 3-6 – Variação das perdas totais e de B50 com o ângulo de corte das amostras.



Fonte: Landgraf *et al.* (2001)

Comparando-se os valores medidos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977), com as amostras cortadas somente em um sentido de laminação obtêm valores diferentes para as perdas. A Figura 3-7 apresenta as perdas no ferro, medidas em quadro de Epstein, considerando-se o sentido de laminação com três conjuntos de amostras, 100% longitudinal ou paralelo (PAR), 100% transversal ou perpendicular (PER) e misto de 50% PAR e 50% PER.

Figura 3-7 – Perdas no ferro com diferentes sentidos de laminação  
(Perdas [W/kg] x Frequência [Hz])

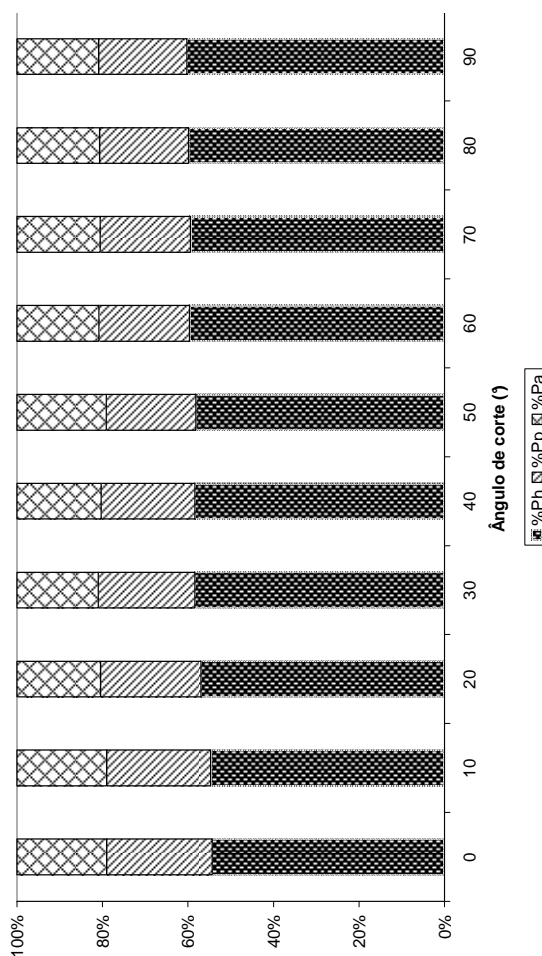


Fonte: Dados de ensaios realizados pelo autor

Em Landgraf *et al.* (2001) também foi realizada a separação das perdas nas componentes histerética, parasítica e anômala ou excedente. Conforme pode ser verificado na Figura 3-8, em relação ao ângulo de

corte, a parcela de perda histerética apresenta a mesma tendência das perdas totais, sendo a parasítica praticamente constante e a anômala apresenta sensível incremento. Ainda com relação ao ângulo de corte, pode-se observar que a tendência da separação de perdas permanece, ou seja, observa-se que a maior contribuição se deve às perdas histeréticas.

Figura 3-8 – Contribuição das parcelas Ph, Pp e Pa nas perdas totais



Fonte: Landgraf *et al.* (2001)

Atualmente o ensaio de caracterização é realizado por um sistema composto basicamente por duas fontes de alimentação, um conjunto de

instrumentos analógicos, um quadro de Epstein e dois indutores. As fontes de alimentação são compostas por um gerador acionado por um motor de corrente contínua, para a medição de perdas com variação de frequência, e outra formada por um gerador 60 Hz, utilizado no ensaio para levantamento da curva de magnetização. O conjunto de instrumentação proporciona a medição da corrente, tensão, potência e frequência. É possível realizar a medição das perdas do material dentro da faixa de frequência entre 30 e 67,5 Hz, bem como levantar a curva de magnetização do material a 60 Hz.

O novo sistema foi idealizado para realizar a caracterização de aços elétricos, medindo as perdas totais de determinado conjunto de lâminas de Epstein, a curva de magnetização e calcular as componentes das perdas dinâmicas e estáticas. A proposta deste trabalho é montar um sistema para a caracterização de materiais magnéticos que seja moderno, automático e que possa realizar ensaios de separação de perdas e levantar a curva de magnetização dos materiais.

## 4 AÇOS PARA FINS ELÉTRICOS

O aço e suas ligas são utilizados nas mais diversas aplicações, desde a construção civil até a manufatura de equipamentos específicos. Esta diversificação e maleabilidade está associada às diversas possibilidades de combinação e arranjo da estrutura química e do processo de fabricação do material, fato este que afeta as propriedades elétricas, magnéticas e mecânicas dos elementos de liga.

Neste capítulo procura-se apresentar o contexto dos aços industriais e o motivo do desenvolvimento da linha de aços para fins elétricos. Serão discutidas a relevância e a necessidade da caracterização destes materiais quando se considera a aplicação em máquinas elétricas.

### 4.1 BREVE HISTÓRICO

As máquinas elétricas canalizam o fluxo magnético em seu interior, por esse motivo, o núcleo dessas máquinas é formado por materiais ferromagnéticos de baixa relutância magnética. Visto deste ângulo os aços industriais com concentrações de materiais ferrosos, atenderiam as necessidades das máquinas elétricas. O desempenho das máquinas era ajustado no projeto eletromagnético. Até então, os materiais existentes atendiam as necessidades dos fabricantes. Esta prática, comumente adotada entre os fabricantes de máquinas elétricas, foi modificada a partir do momento em que houve a necessidade de adequação do produto às exigências normativas, para atender aos níveis mínimos de desempenho do crescente e exigente mercado internacional.

A tecnologia veio em auxílio a esta adequação oportunizando a simulação e aperfeiçoamento das ferramentas de cálculo e a otimização do projeto eletromagnético/mecânico das máquinas elétricas. Todavia as exigências de desempenho requeriam uma melhora das características físicas dos materiais para que se obtivessem ganhos reais de desempenho. Sendo assim, as necessidades dos fabricantes de máquinas elétricas, aliado com a visão de mercado das aciarias, originou a linha dos aços para fins elétricos.

As exigências de desempenho dos materiais magnéticos, por parte dos fabricantes de máquinas elétricas, abrangem tanto características eletromagnéticas, observadas diretamente no produto final acabado e em funcionamento, quanto as características mecânicas necessárias às etapas de pré e pós-processamento do aço na produção do material.

No que tange às máquinas elétricas, também é observada essa diversidade de possibilidades na aplicação e utilização de ligas de aços industriais. Itens como a manufatura da carcaça, pés e tampa defletora de motores de pequeno porte (maleabilidade e resistência a deformações), carenagens de máquinas de grande porte, que utilizam chapas soldadas (ductilidade e soldabilidade), eixos de geradores e motores síncronos (dureza e resistência à torção), parte estrutural dos transformadores (resistência a deformações), são alguns exemplos de utilização.

## 4.2 MATERIAL ESPECÍFICO E DIFERENCIADO

A denominação de aços elétricos se dá a um material desenvolvido para atingir seu melhor desempenho atendendo as características desejáveis sob o ponto de vista eletromagnético e mecânico. Uma vez que o material ativo das máquinas elétricas pode, num primeiro momento, ser formado por qualquer tipo de aço, essas características se sobressaem na medida em que há necessidade de ser ter maior competitividade e portanto um produto que possa exigir ao máximo das características desejadas em termos eletromagnéticos do material. Sendo assim, os fabricantes de aço ofertam soluções de materiais com baixas perdas e permeabilidade elevada, que necessitam ou não de processamento após estampagem e que sejam atrativas em termos da relação custo/benefício, cabendo aos clientes realizarem os testes e ensaios necessários para cada aplicação.

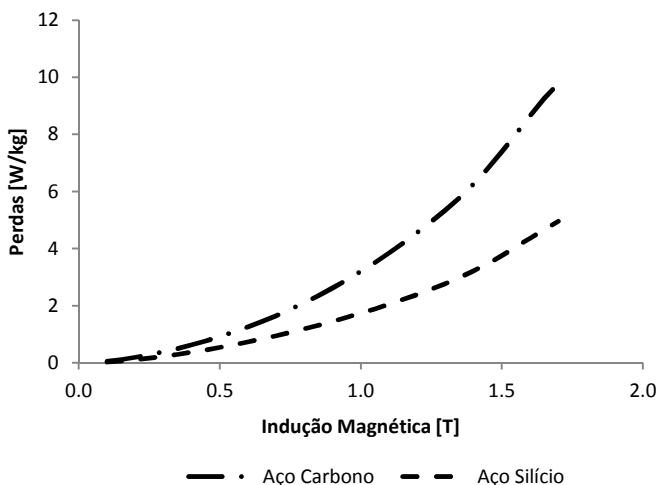
A escolha do material segue critérios técnicos e comerciais que possibilitam uma maior maleabilidade quando da seleção e aprovação de um fornecedor ou solução apresentada. Embora existam linhas de aços específicas para máquinas elétricas, neste capítulo iremos apresentar alguns aspectos desses materiais, mais precisamente de um aço carbono de menor custo e de um aço silício representando um material de maior valor agregado.

### 4.2.1 Noções de Perdas de Origem Magnéticas

A perda de origem magnética ou perda no ferro é composta praticamente por três parcelas: uma devido às correntes induzidas no ferro, as perdas devido à histerese e as perdas anômalas ou excedentes, devido a fenômenos que ocorrem na microestrutura do material quando submetido a um campo magnético variante no tempo.

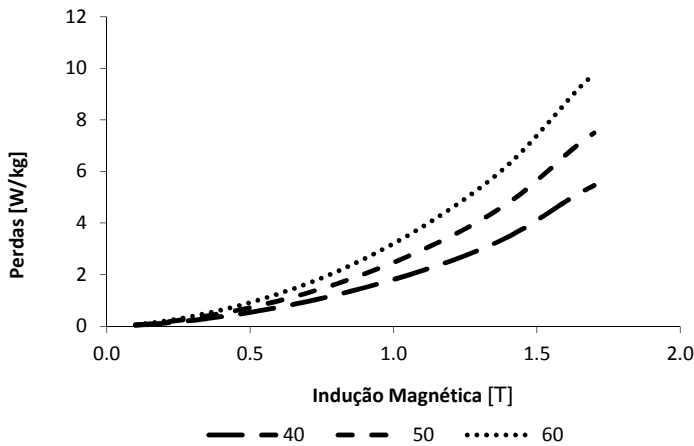
Quando o circuito magnético é alimentado por sinal senoidal a variação da perda é função da frequência e da indução magnética de trabalho, na Figura 4-1 tem-se as perdas na frequência de 60 Hz para o aço sem processamento (aço carbono) e para o totalmente processado (aço silício). É possível perceber com clareza que, para uma dada indução magnética, os materiais possuem características de perdas distintas. Dessa forma, a variação percentual da composição química aliada a processos de fabricação diferenciados, tem influência tanto na performance eletromagnética, melhorando as propriedades dos materiais, quanto na mecânica, no que se refere ao pós e pré-processamento, como também no custo destes para o fabricante de máquinas elétricas.

Figura 4-1 – Perdas em 60 Hz para duas classes de aços



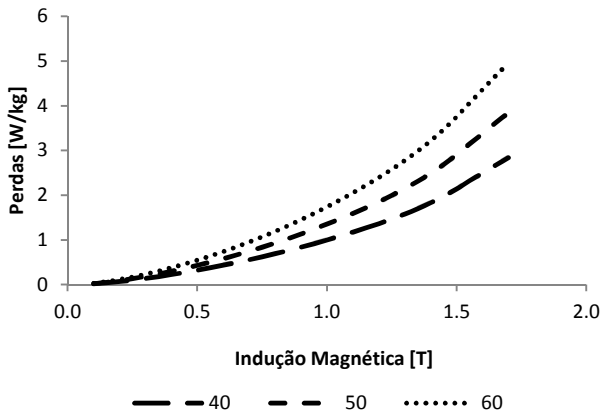
O comportamento das perdas em diferentes frequências, para o aço carbono, pode ser visto na Figura 4-2. Para uma determinada intensidade de indução máxima, a perda aumenta na medida em que a frequência de trabalho, aplicada ao material magnético, também aumenta. Entretanto, devido à estrutura dos materiais ferromagnéticos e suas ligas metálicas, os fenômenos eletromagnéticos que ocorrem no interior do material, quando submetido à influência de campos magnéticos, tem um comportamento não linear.

Figura 4-2 – Perdas do aço carbono com aumento da frequência



Comportamento semelhante ao observado para o aço carbono pode ser verificado no aço silicioso Figura 4-3, porém com níveis de perdas inferiores.

Figura 4-3 - Perdas do aço silício com aumento da frequência



4.2.2 Laço de Histerese

O laço de histerese é consequência da resposta do material quando submetido a uma alimentação variante no tempo. A área do laço

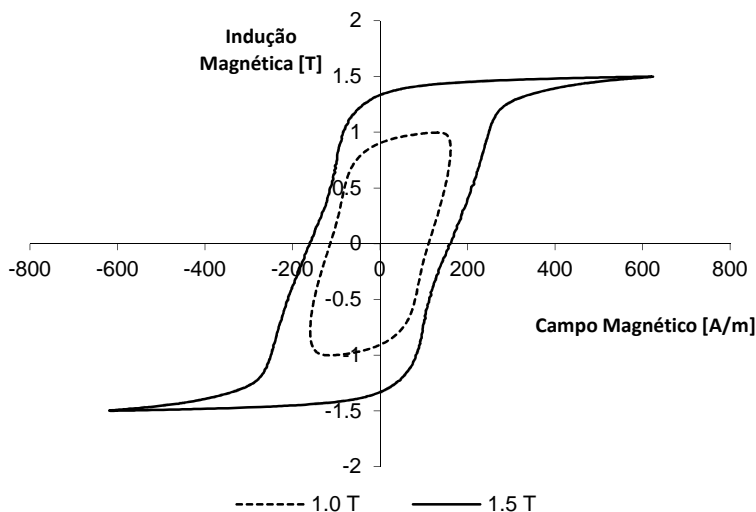


de histerese representa a parcela das perdas no ferro devido ao efeito da histerese magnética. A perda histerética é função da energia necessária para a orientação dos domínios magnéticos na microestrutura do aço.

Embora a forma do laço de histerese seja semelhante para os aços moles, ela apresenta características particulares para cada tipo de material.

Na Figura 4-4 são apresentados os laços de histerese para as induções de 1,0 T e 1,5 T de um aço sem processamento tratado termicamente.

Figura 4-4 – Curva BxH de um aço carbono

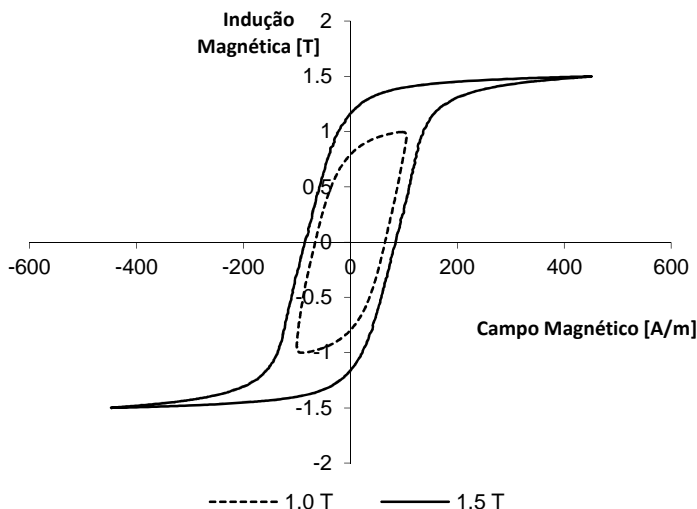


A Figura 4-5 apresenta os laços para um aço totalmente processado nas mesmas induções utilizadas na Figura 4-4.

Para o mesmo material, a área dos gráficos aumenta quando se aumenta a indução magnética.

Quando as duas classes de aços são comparadas, o aço silício totalmente processado possui menor área de histerese que o aço carbono sem processamento, para a mesma indução e isto representa uma menor parcela de perdas no ferro de origem histerética.

Figura 4-5 – Curva BxH para um aço silicioso



### 4.3 ASPECTOS MECÂNICOS, QUÍMICOS E MAGNÉTICOS

Na análise do comportamento dos aços elétricos são utilizadas informações referentes às suas propriedades e características mecânicas, composição química e propriedades magnéticas.

#### 4.3.1 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas de maior interesse são a dureza e as tensões de escoamento e ruptura por tração.

#### 4.3.2 Características Mecânicas

Dentre as características mecânicas gerais podem-se citar a usinabilidade, dureza, esforços, soldabilidade, ductilidade e tenacidade, conformação, trabalhabilidade, resistência ao desgaste e fadiga, capacidade de amortecimento, limite de escoamento e a constância das propriedades mecânicas.

### **4.3.3 Composição Química**

A composição química é basicamente utilizada como ferramenta investigativa e de avaliação da qualidade do aço em teste. Investigativa porque pode fornecer respostas e ou indicações relativas ao comportamento mecânico e elétrico do material. Como ferramenta de controle de qualidade compara os valores medidos de carbono (C), manganês (Mn), enxofre (S), alumínio (Al) e silício (Si) com os limites normalizados, previamente estabelecidos pelo departamento de suprimento.

### **4.3.4 Propriedades Magnéticas**

As propriedades magnéticas fornecem uma indicação do comportamento efetivo do material, uma vez que os resultados são obtidos por meio de ensaio físico em corpo de prova, realizado por método normalizado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) que utiliza um dispositivo chamado quadro de Epstein e que simula uma série de condições de trabalho, mas que infelizmente, não simula as condições reais nas quais o material será submetido na aplicação final.

A grande vantagem deste método é que ele também é utilizado pelas aciarias para avaliação da qualidade e montagem das especificações de catálogo. Desta forma é possível a comparação dos valores obtidos nos ensaios de laboratório com os valores típicos apresentados nos catálogos dos fornecedores.

## **4.4 NOMENCLATURA**

Empresas comprometidas com o desenvolvimento dos diversos setores produtivos do mercado nacional privilegiam a obtenção da matéria prima no mercado interno.

Com o advento da globalização, esse comprometimento é influenciado pelas regras da logística econômica. A busca mundial por matéria prima de qualidade a custos reduzidos é estratégica para a competitividade. Sendo assim, é aconselhável a diversificação de fornecedores, como medida de segurança, em função das flutuações e instabilidades de mercado.

Nesse contexto, iniciou-se um criterioso e massivo trabalho de credenciamento de novos fornecedores a nível internacional, organizado

pelo setor de suprimentos e executado por um grupo multidisciplinar de especialistas.

Aços de diferentes fornecedores e novas categorias passaram a circular pelos departamentos fabris e para evitar confusões, erros de processamento e montagem com consequente retrabalho, houve a necessidade de uma adequação dos itens de produção por parte do departamento de PCP e uniformizar a nomenclatura até então utilizada. Esse processo resultou na nomenclatura apresentada na Quadro 4-1.

Quadro 4-1 – Nomenclatura uniformizada para os aços elétricos

Tipo	Descrição	Perdas (W/kg) @ 1,5 T 60 Hz	Espessura (mm)	Empresa
1100-60TP	Chapa de aço carbono TP	11	0,6	Core 601100
1100-60SP	Chapa de aço carbono 1006 MD SP	11	0,6	1006 MD
1015-50TP	Chapa de aço revestido TP	10,15	0,5	50A800
550-50SP	Chapa siliciosa SP	5,5	0,5	Core 260
519-50TP	Chapa siliciosa TP	5,19	0,5	E230 ou 50A470
433-50TP	Chapa siliciosa TP	4,33	0,5	E170 ou 50A400

## 4.5 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS ELÉTRICOS

A classificação dos aços elétricos é geralmente realizada em termos de sua estrutura física e processo de produção.

### 4.5.1 Quanto à Estrutura Física

Esta classificação leva em conta a orientação dos cristais que formam sua rede cristalina, ou seja, é uma característica física do material. Pode ser do tipo grão não orientado ou grão orientado.

#### **Aços de Grão Não Orientado (GNO)**

O aço GNO possui um menor grau de anisotropia, ou seja, suas propriedades magnéticas estão distribuídas de forma aleatória nas direções do plano de laminação e são utilizados em aplicações onde o

fluxo magnético está em constante variação. Um exemplo de aplicação são as máquinas elétricas girantes que, em função da disposição dos enrolamentos e a alimentação senoidal produzem um fluxo magnético girante. Dessa forma a média das perdas no material tem um comportamento praticamente uniforme em todas as direções.

### **Aços de Grão Orientado (GO)**

Estão nesta categoria os aços que possuem as propriedades magnéticas orientadas no sentido de laminação. Isto significa que as perdas magnéticas do material são menores neste sentido em comparação a qualquer outro. Como exemplo de aplicação pode-se citar os transformadores, que pela sua concepção e projeto permite o conhecimento prévio do caminho do fluxo magnético.

#### **4.5.2 Quanto ao Processo de Fabricação**

Esta classificação é utilizada para indicar se o aço já possui um pré-processamento, realizado na aciaria, ou se deverá sofrer algum tipo de pós-processamento, realizado a critério do cliente, segundo o tipo de aplicação, para o melhoramento de suas propriedades magnéticas.

### **Não Processados**

São os aços que possuem altas perdas magnéticas, pequeno TG e não possui camada isolante. São usualmente do tipo ASTE 1006 e 1008.

### **Semi-Processados**

Os aços semi-processados possuem teores controlados de carbono (C), silício (Si), magnésio (Mg), fósforo (P) e alumínio (Al). Necessitam de tratamento térmico para promover o crescimento de grão e criar uma fina película isolante na superfície do material, conhecida por Core. Outro processo que ocorre no forno é o de descarbonetação que se caracteriza pela redução de carbono do material. Em outras palavras esses aços requerem um tratamento térmico no usuário final para alcançar o desenvolvimento estrutural, químico e magnético.

## **Totalmente Processados**

Os aços totalmente processados possuem propriedades garantidas, ou seja, na aciaria foram realizados os processos necessários para se chegar aos valores informados em catálogo. Dessa forma possuem estrutura e composição química desenvolvidas o cliente recebe o material pronto, em condições de ser processado, sem necessidade de pré ou pós-processamento adicional.

Em alguns casos, entretanto, quando são utilizados na fabricação de motores de pequeno porte, é necessário realizar o alívio de tensões. Esse processo ocorre no forno e serve para reduzir as tensões inseridas no material quando do processo de estampagem.

## **Aços produzidos por Metalurgia do Pó**

A metalurgia do pó está sendo empregada principalmente em aplicações que exploram caminhos tridimensionais para o fluxo magnético, como por exemplo as máquinas de fluxo transversal, ou em estruturas mecânicas mais complexas em que e os processos de corte de chapas não atende, como por exemplo arestas arredondadas, geometrias complexas com dimensões reduzidas, acabamento de melhor qualidade sem rebarbas, dentre outros.

O pó utilizado para a fabricação das estruturas é formado por partículas magnéticas cobertos com uma camada de isolamento e um material aglutinante. Este material é depositado em uma matriz e posteriormente comprimido, a fim de proporcionar uma maior resistividade elétrica, sem contudo, afetar as propriedades magnéticas do material. Embora os materiais elaborados com a metodologia do pó possuam perdas no ferro reduzidas, quando comparado com as estruturas magnéticas produzidas com chapas estampadas, ainda possuem permeabilidade aquém das apresentadas pelos materiais estampados.

Outros fatores que ainda influenciam em sua disseminação são o custo de produção e a adaptação das estruturas existentes para o emprego da nova tecnologia. Todavia, existem no Brasil algumas empresas que empregam esta tecnologia para a fabricação de núcleos de transformadores comerciais.

## 4.6 PROCESSAMENTO DOS AÇOS

Nesse tópico serão abordados sucintamente alguns aspectos das etapas de processamento dos aços, particularmente os que afetam as propriedades magnéticas dos materiais, quando a bobina chega aos fabricantes de máquinas elétricas. Dentre os processos mais usuais estão a estampagem, o puncionamento e o corte a laser. Neste trabalho iremos nos ater ao processo de estampagem por ser utilizado em larga escala na empresa.

Para a manufatura do material ativo dos motores, tanto da parte estática (estator) quanto da parte girante (rotor), é necessário o corte da bobina de aço nas dimensões necessárias em função do tipo e da linha que será produzida. Dentre os processos mais utilizados estão a estampagem, o puncionamento, a guilhotina, o corte a laser, o corte a plasma e a fotocorrosão.

### 4.6.1 Processo de Corte da Bobina Mãe

As indústrias que possuem alto volume de operações de estampagem utilizam guilhotinas rotativas, também conhecidas como Slitter, para cortar a bobina mãe em forma de tiras menores, segundo o plano de corte pré-estabelecido e otimizado para um melhor aproveitamento da bobina mãe. Por ser um processo de corte contínuo, o Slitter possui conjuntos de facas em forma de anéis dispostas conforme o plano de corte que cobrem a largura da bobina mãe. Resumidamente envolve três macro-etapas de processamento, o desbobinar, cortar e rebobinar o material “slitado”, após o qual estará pronto para a próxima etapa do processo.

### 4.6.2 Processo de Puncionamento

O sistema é constituído basicamente por um punção e uma mesa de corte específicos para cada linha. A chapa é posicionada na mesa de corte e ao iniciar o processo o punção realiza o corte ranhura por ranhura enquanto a mesa gira o aço de um passo de ranhura por vez.

O puncionamento é utilizado em peças que possuem diâmetro maior que a prensa, em peças especiais oriundas de protótipos e como recurso substituto à estampagem, quando esta, por algum motivo não possa ser empregada.

### 4.6.3 Processo de Corte a Laser

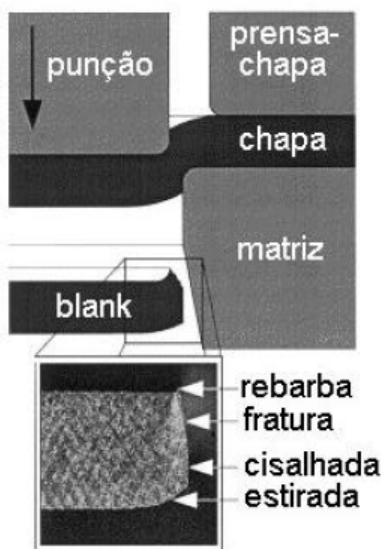
É composto praticamente pelo canhão de raio laser e seu controle de posicionamento. Utilizado para o corte de protótipos especiais que vão desde motores conceito até máquinas com projeto diferenciado e chapas com espessuras maiores que 0,7 mm, utilizados na fabricação de carcaças de motores e geradores.

### 4.6.4 Processo de Estampagem

O processo de estampagem caracteriza-se basicamente pela ação de uma prensa hidráulica que punciona um molde sobre a chapa de aço, cortando o material no formato desejado.

Segundo Magella, Torre e Kühn (2002) O processo de estampagem pode ser caracterizado por uma grande quantidade de deformação seguida de fratura dúctil Figura 4-6. A região mais afetada está localizada próximo ao eixo de corte do punção com a matriz. Esta região é afetada em suas propriedades magnéticas.

Figura 4-6 – Etapas de corte do processo de estampagem



Fonte: Magella, Torre e Kühn (2002)

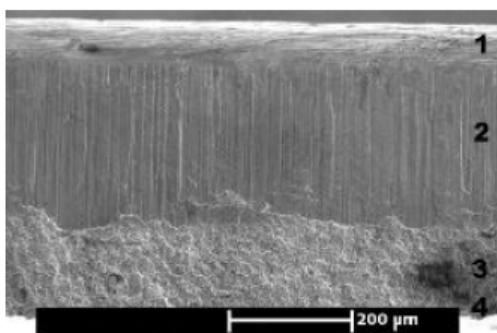


Segundo os autores, são em número de quatro as zonas distintas oriundas do processo de estampagem. Estas regiões são caracterizadas como:

- a) A zona estirada (roll-over): parte da chapa estirada pelo punção;
- b) A zona cisalhada: região conformada pelo punção antes do início da fratura dúctil apresenta a superfície bastante lisa;
- c) A zona de fratura. Nesta região a superfície é rugosa como resultado da fratura do material causada pelo contínuo movimento do punção através da chapa.
- d) Rebarba: formada em consequência da localização específica do início da fratura. (MAGELLA; TORRE; KÜHN 2002, p. 2)

Em consequência do processo de estampagem são inseridas tensões mecânicas nas adjacências da região de corte. Na Figura 4-7 pode-se observar uma imagem feita por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da seção de corte de um aço SP. Podem ser identificadas as quatro zonas, criadas no processo de estampagem, 1 – zona estirada, 2 – zona cisalhada, 3 – zona de fratura, e 4 – rebarba.

Figura 4-7 – Seção de corte de um aço SP (MEV)



Fonte: Magella, Torre e Kühn (2002)

Os efeitos dessas tensões mecânicas são relevantes em motores de pequeno porte. Isto porque estes motores possuem reduzida área útil de dente, em outras palavras, as dimensões da geometria do dente são da mesma ordem de grandeza da dimensão da espessura do aço utilizado.

Tecnicamente, para estes motores, o acréscimo da região afetada pelas deformações estruturais devido ao processo de estampagem, incrementa significativamente as perdas no ferro, afetando o desempenho do material. Nestes casos, para recuperar as características originais do material é necessário realizar um processo conhecido como “alívio de tensões”, que consiste em retirar as tensões inseridas no material quando do processo de estampagem por meio de um processo realizado no forno no qual o material estampado fica em repouso por um tempo determinado em temperatura controlada.

#### 4.7 TRATAMENTO TÉRMICO E ALÍVIO DE TENSÕES

Uma das finalidades do tratamento térmico (TT) é realizar o controle do tamanho de grão, fazer a descarbonetação e promover a oxidação superficial nos aços de grão não orientado (GNO) sem processamento e nos aços semi-processados. Nos materiais totalmente processados o tratamento térmico, quando utilizado, controla o tamanho de grão e proporciona as condições necessárias para realizar o alívio de tensões necessário para a recuperação das propriedades magnéticas atingidas durante o processo de estampagem.

O processo de TT, utilizado nas amostras deste trabalho, tem como característica a atmosfera descarbonetante, por cerca de duas horas a uma temperatura entre 720 e 870 °C.

##### 4.7.1 Recristalização

Designação que se dá ao processo de recuperação das propriedades mecânicas que foram alteradas como resultado do trabalho a frio, dessa forma são restaurados os valores existentes anteriormente. O processo constitui da formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação e que possuem dimensões aproximadamente iguais em todas as direções (equiaxiais), com baixas densidades de discordâncias. Os novos grãos se constituem na forma de núcleos muito pequenos e crescem até que substituam completamente o seu material de origem (CALLISTER JR., 2002).

##### 4.7.2 Crescimento de Grão

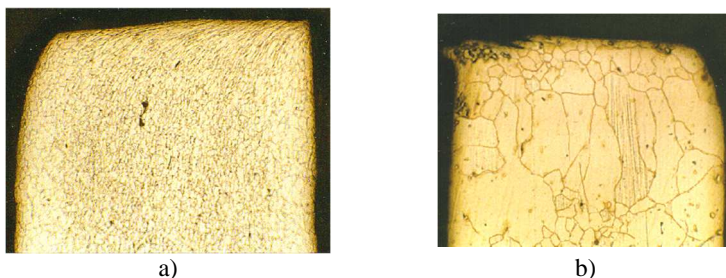
O crescimento de grão é um processo que ocorre após a recristalização, se o material permanecer em temperatura elevada. Durante esta etapa, os grãos livres de deformação continuarão a crescer

e este crescimento ocorre pela migração de contornos de grão. Nem todos os grãos podem aumentar de tamanho, porém os grãos maiores crescem à custa dos grãos menores, que encolhem (CALLISTER JR., 2002).

Na micrografia do aço carbono 1006 sem tratamento térmico (ST) Figura 4-8a e com tratamento térmico (TT) Figura 4-8b pode-se observar a deformação plástica causada pela ferramenta de estampagem. Esta região se caracteriza por um maior grau de encruamento bem como a geração de rebarba e fissura.

Este aço por ser uma material sem processamento, obrigatoriamente necessita de tratamento térmico para baixar os níveis de perdas e melhorar a permeabilidade. Pode-se observar nas micrografias o efeito do tratamento térmico no crescimento do grão e o alívio de tensões na região anteriormente encruada.

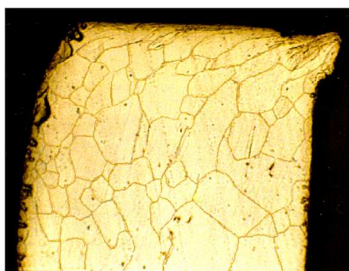
Figura 4-8 – Aço carbono: a) 1006 ST e b) 1006 TT



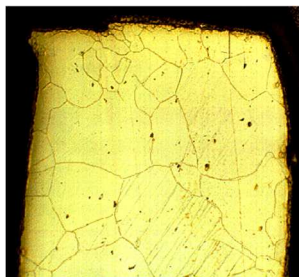
Nas Figura 4-9 a) e b) são apresentadas as micrografias do aço silício 50A400 também nas condições ST e TT. Podem-se observar os mesmos efeitos, sendo que, neste caso, o tratamento térmico, além de provocar o alívio de tensões na região de corte tem por objetivo recuperar as propriedades magnéticas que foram afetadas durante o processamento, aos níveis que o material possuía antes do trabalho a frio.

Convêm salientar que este processo, nos aços totalmente processados, é aplicado em casos especiais, onde há a necessidade de redução de perdas. Normalmente em máquinas com geometria reduzida a região afetada pelo processo de estampagem pode influenciar em seu desempenho. Este comportamento normalmente se observa em geometrias onde as dimensões da estruturas são da mesma ordem de grandeza da espessura do material a ser utilizado.

Figura 4-9 – Aço silício: a) 50A400 ST e b) 50A400 TT



a)



b)

#### 4.8 O AÇO IDEAL PARA FABRICANTES DE MOTORES ELÉTRICOS

Os fabricantes de máquinas elétricas possuem critérios rigorosos para a escolha e utilização dos aços elétricos. Em termos de desempenho deseja-se que o material apresente características técnicas ideais, tanto do ponto de vista de aproveitamento e utilização do material ativo, quanto de sua manipulação e processamento. Fisicamente o que acontece é que algumas características desejadas são conflitantes e não podem ocorrer concomitantemente. Nestes casos prioriza-se uma em detrimento da outra em função das necessidades de cada fabricante e do produto a que se destinam.

Existem basicamente três características essenciais que devem ser observadas quando da seleção de material para a manufatura dos núcleos das máquinas elétricas. A primeira diz respeito às características eletromagnéticas que o material deve necessariamente possuir para que o motor atinja as especificações técnicas de desempenho desejado. A segunda característica é referente às especificações mecânicas do material que devem ser obedecidas para que se possa realizar o processamento do material sem prejuízo no processo produtivo. A terceira característica é a comercial que deve avaliar os investimentos necessários na aquisição da matéria prima, contrabalançar com os ganhos futuros, levando em consideração os interesses da empresa. Análise esta muitas vezes difícil de ser realizada, uma vez que os ganhos podem não ser imediatos ou até mesmo mensuráveis, refletindo normalmente no produto final já acabado. Embora não sendo de cunho

técnico, é a que normalmente prepondera sobre as outras duas, tomando a decisão final quanto à aquisição ou não da matéria prima em questão.

#### **4.8.1 Características Eletromagnéticas**

São as relacionadas diretamente ao desempenho do aço na máquina, para que o material tenha uma resposta adequada quando submetido ao regime de trabalho projetado.

Dessa forma é desejável que o material apresente reduzidas perdas nas induções de trabalho, o que, em outras palavras significa altos rendimentos do motor, tenha uma elevada capacidade de amplificação do campo magnético, que se traduz por uma alta permeabilidade magnética ( $\mu$ ). Essa característica influencia no esforço que a máquina tem que realizar para atingir um nível de indução desejado, isto é, nos valores de corrente de magnetização necessário para atingir a indução de trabalho projetada.

Também pertencem às características desejadas do material que este possua uma elevada indução magnética de saturação ( $B_s$ ). Quanto maior esta característica haverá um melhor aproveitamento do material magnético ativo em termos da necessidade de um menor campo magnético ( $H$ ) e em consequência haverá menores correntes circulando nos enrolamentos para se atingir as induções desejadas. Havendo diminuição da corrente ocorre também redução das perdas por efeito Joule e naturalmente toda a redução de perda afeta o valor do rendimento da máquina.

Outra característica não menos importante é a resistividade elétrica que pode ser traduzida como uma maior dificuldade na formação das correntes parasitas ou de Foucault que se formam nos núcleos magnéticos. Deve ser de valor elevado ocasionando redução nas perdas no ferro além de afetar diretamente os valores de rendimento.

#### **4.8.2 Características Mecânicas**

Estas características são relevantes para os fabricantes de motores que realizam internamente o processamento o aço (corte e tratamento térmico). Quando o processamento é terceirizado, a preocupação com as características mecânicas passa para o prestador do serviço.

A empresa parceira possui a característica peculiar de ser uma empresa verticalizada, sendo assim se encaixa no primeiro caso. Possui um departamento específico para a realização do processamento do aço utilizado por toda a empresa. Está a cargo do departamento de

estamparia a preocupação, controle e análise de possíveis alterações das características mecânicas que possam ocorrer ou que sejam solicitadas pelos fornecedores de aço.

No que concerne às características de comportamento dos aços para fins elétricos é desejável que possuam elevada resistência mecânica, tanto à tração, o que favorece o manuseio do material nas prensas, quanto à compressão, uma vez que os pacotes de chapas devem ser inseridos dentro das carcaças de ferro fundido. Este processo não deve prejudicar significativamente as propriedades magnéticas do aço sob pena de prejudicar o desempenho do produto final.

Boa puncionabilidade no processo de estampagem é exigida em função das deformações inseridas pelo processo que afetam as características magnéticas do material, conforme discutido no item 4.6.

O material deve possuir ainda boa soldabilidade, devido à utilização do processo de soldagem para fixar as lâminas do pacote de chapas, utilizado em algumas linhas de motores.

Existem ainda outras características mecânicas gerais, tais como a usinabilidade, dureza, esforços, ductilidade e tenacidade, conformação, trabalhabilidade, resistência ao desgaste e fadiga, capacidade de amortecimento e limite de escoamento que direta ou indiretamente podem afetar o desempenho das máquinas elétricas. Quantificar esta influência requer um estudo aprofundado e competências em áreas que fogem ao escopo deste trabalho.

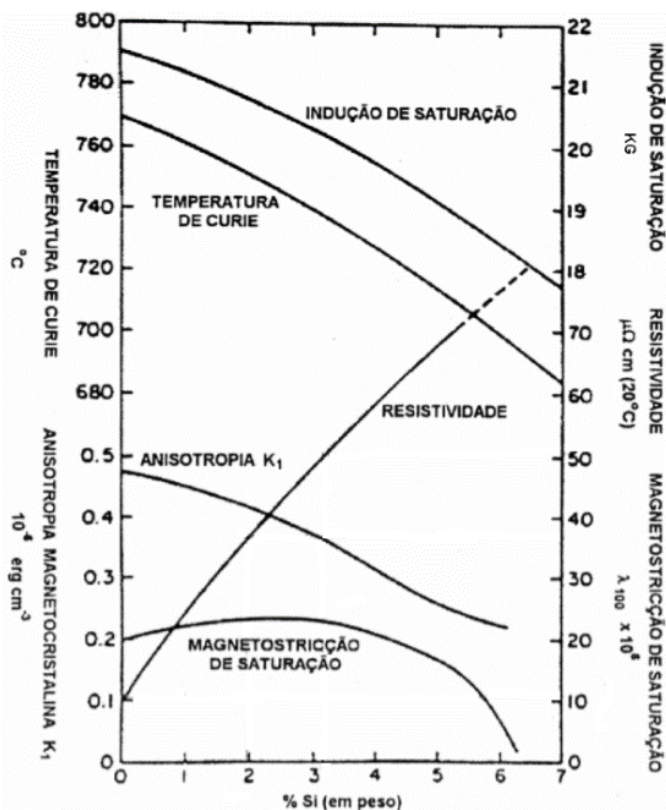
#### **4.8.3 Composição Química**

O acréscimo de silício nos aços elétricos utilizados na construção de motores, geradores e transformadores, tem como objetivo principal melhorar o rendimento das máquinas elétricas através da redução das perdas no ferro.

A adição de silício na composição química dos aços elétricos traz vantagens e desvantagens. Uma das vantagens está no aumento da resistividade do aço, o que acaba dificultando a propagação das correntes de Foucault e por consequência diminuindo a parcela de contribuição das perdas parasíticas na formação das perdas no ferro final. Na Figura 4-10 pode-se observar o comportamento da resistividade em função dos teores de silício. Embora exista um ponto ótimo no qual seria possível a obtenção de elevados valores de resistividade, até aproximadamente 11% de Si, esse percentual dificilmente ultrapassa os 4%, isto porque o efeito do silício nas propriedades do aço tem comportamento conflitante.

Entretanto outras propriedades do ferro, igualmente importantes, também são afetadas pelo incremento do %Si como mostrado na Figura 4-10. A redução da indução de saturação é um exemplo, uma vez que, para a adição do elemento silício é necessário a retirada do elemento ferro, e em consequência diminui a permeabilidade do aço, acarretando aumento na corrente a vazio e diminuição do  $\cos \varphi$  da máquina. A indução de saturação, a temperatura de Curie e a anisotropia decrescem com os acréscimos de silício.

Figura 4-10 – Influência do %Si em algumas propriedades intrínsecas do Fe



Fonte: (CARDOSO, 2005).

A melhora da permeabilidade máxima do material, para teores de silício acima de 2,5%, influencia na redução da área do laço de histerese e consequentemente a redução das perdas. Outra vantagem é que a

adição de silício melhora da textura cristalográfica facilitando o alinhamento dos cristais (LANDGRAF, TEIXEIRA e RODRIGUES, 2002).

Do ponto de vista metalúrgico o acréscimo de silício aumenta a dureza do aço, o que implica em um maior desgaste da ferramenta de corte e consequentemente uma maior frequência na afiação do estampo além de aumentar a fragilidade do material.

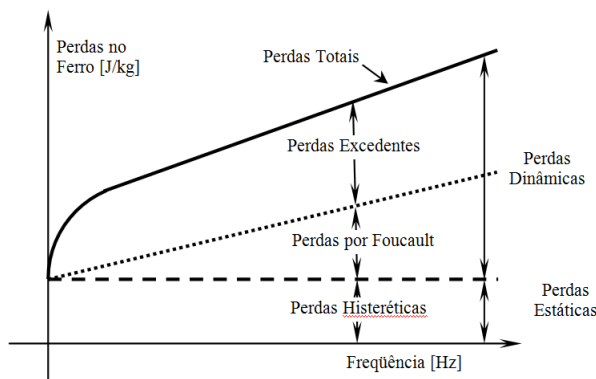
Os teores de silício devem ser controlados e ficam em torno de 0,6% para os aços semi-processados e 1,6% para os aços totalmente processados.

#### 4.9 PERDAS MAGNÉTICAS NOS AÇOS ELÉTRICOS

As perdas magnéticas nos aços elétricos são de extrema importância para o controle de qualidade dos materiais utilizados. Adota-se a análise das perdas nas induções de 1,0 T e 1,5 T em 50 e 60 Hz, observando-se o valor da permeabilidade magnética em 1,5 T ou em  $B_{50}$ , que representa a permeabilidade magnética quando a amostra é submetida a um campo magnético de 50 A/cm. Esses dados geralmente são encontrados nos catálogos dos fornecedores.

Na Figura 4-11 são apresentadas as componentes das perdas totais no ferro, observa-se que além da divisão nas três parcelas  $p_h$ ,  $p_f$  e  $p_a$ , é usual utilizar também a denominação de perdas estáticas e dinâmicas. As três parcelas das perdas totais será melhor abordada nas seções seguintes.

Figura 4-11 - Representação das componentes das perdas no ferro



Fonte: Adaptado de Batistela, (2001)



Apesar da perda no ferro ser função dos valores de indução e corrente máximas, ela é influenciada pela forma de onda aplicada. Dessa forma é necessário que se estabeleça uma base de referência para que se possa fazer a análise das perdas nos diferentes dispositivos. Sendo assim, convencionou-se adotar a forma de onda senoidal como sendo a forma de onda padrão para se estabelecer os limites das variações das perdas em amostras normalizadas. Esta condição pode ser conseguida por meio de um gerador de onda senoidal ou ainda por uma fonte de corrente alternada com baixos níveis de distorção harmônica. No projeto de um gerador de onda senoidal deve ser previsto uma folga de potência para que o gerador não deforme a forma de onda de tensão aplicada devido à solicitação de corrente do sistema.

Conforme descrito anteriormente é objetivo desse trabalho o desenvolvimento completo de um sistema para ensaio moderno e automático que meça as perdas magnéticas, segundo a normalização vigente. Sendo assim, nas próximas seções é apresentada brevemente a definição das perdas magnéticas sob a óptica da engenharia elétrica. Não serão, portanto, aprofundados conceitos relativos às áreas específicas das Ciências dos Materiais, que correlacionam os aspectos físico-químicos, metalográficos e micro estruturais do comportamento dos aços.

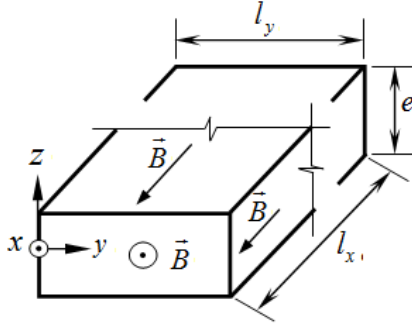
#### 4.9.1 Perda magnética por Correntes de Foucault

A perda magnética por correntes de Foucault pode ser explicada pela lei de Ampère, equação (4.1), que correlaciona as correntes induzidas em um núcleo ferromagnético quando sujeito a um fluxo magnético variável no tempo. Para a dedução da expressão das perdas clássicas utilizam-se as equações do eletromagnetismo aplicadas num modelo que representa a lâmina de um material ferromagnético (BATISTELA, 2001).

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (4.1)$$

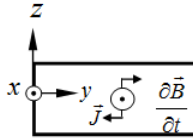
O vetor de indução magnética  $\mathbf{B}(\mathbf{t})$ , representado na Figura 4-12, quando aplicado na direção  $x$  produz uma densidade de corrente  $\mathbf{J}$  com componentes não nulas nas direções  $y$  e  $z$  (Figura 4-13).

Figura 4-12 – Lâmina de material ferromagnético



Uma primeira aproximação pode ser realizada devido ao fato de que na prática uma lâmina de aço possui a dimensão da largura  $l_y$  muito maior que a dimensão da espessura  $e$ . Desta forma, as componentes nas direções de  $x$  e  $z$  podem ser desprezadas.

Figura 4-13 – Sentido da densidade de corrente



Sendo assim, os vetores de  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{J}$  podem ser escritos segundo as equações (4.2) e (4.3).

$$\mathbf{B} = (B, 0, 0) \quad (4.2)$$

$$\mathbf{J} = (0, J, 0) \quad (4.3)$$

O vetor campo elétrico  $\mathbf{E}$  pode ser calculado pela lei de Ohm, desconsiderando-se a densidade de corrente de deslocamento, como:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4.4)$$

Onde:  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material [ $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ]

Supondo um material linear e isotrópico, a condutividade elétrica é um número real positivo, desta forma por (4.4) os vetores  $\mathbf{J}$  e  $\mathbf{E}$  possuem a mesma direção.

$$\mathbf{E} = (0, E, 0) \quad (4.5)$$

Utilizando a lei de Faraday (4.6) nas equações (4.2) e (4.5) tem-se (4.7).

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \partial_x & \partial_y & \partial_z \\ 0 & E & 0 \end{bmatrix} = -\left(\frac{\partial B}{\partial t}, 0, 0\right) \quad (4.7)$$

$$\left(\frac{\partial E}{\partial z}, 0, \frac{\partial E}{\partial x}\right) = -\left(\frac{\partial B}{\partial t}, 0, 0\right) \quad (4.8)$$

Resolvendo-se a equação (4.7) obtêm-se (4.8). Esta equação nos fornece duas importantes informações, a primeira é o sentido da variação da indução (4.9) e a outra é que o campo elétrico não sofre variação no sentido  $x$  (4.10), ou seja, independente dos valores de  $y$  e  $z$ , o vetor campo elétrico é independente de qualquer variação na direção de  $x$ .

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = 0 \quad (4.10)$$

Considerando que no meio da lâmina ( $z = 0$ ) não existe descontinuidade da corrente elétrica,  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{J}$  devem ser iguais a zero para não haver descontinuidade, de forma que;

$$E(z, t) = -\frac{\partial B}{\partial t} z \quad (4.11)$$

A perda instantânea por efeito Joule no volume de lâmina é dada por:

$$P_f = \int_v \sigma E^2 dv \quad (4.12)$$

Aplicando (4.12) para a lâmina de aço tem-se:

$$P_f = \int_{-e/2}^{e/2} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \sigma \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 z^2 dx dy dz \quad (4.13)$$

Cuja solução da integral é dada por:

$$P_f = \frac{\sigma}{12} \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 l_x l_y e^3 \quad (4.14)$$

O volume da chapa é dado por:

$$Vol = l_x l_y e \quad (4.15)$$

A perda por volume [W/m<sup>3</sup>] será dada por:

$$p_{f\_v} = \frac{P_f}{Vol} = \frac{\sigma}{12} \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 e^2 \quad (4.16)$$

Dividindo-se (4.16) pela densidade do material  $\rho$  dado em [kg/m<sup>3</sup>], podemos representar o valor das perdas em [W/kg] (4.17). O cálculo do valor médio das perdas pode ser obtido pela integração de (4.17) no tempo (4.18).

$$p_f = \frac{\sigma e^2}{12\rho} \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 \quad (4.17)$$

$$p_f = \frac{\sigma e^2}{12\rho} \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 dt \quad (4.18)$$

Em (4.17) observa-se que a perda no ferro é função da forma de onda da indução, dessa forma, ela pode ser empregada para o cálculo das perdas por correntes de Foucault quando o material é submetido a qualquer regime de tensão induzida (4.19). Quando o sistema é alimentado com uma forma de onda de tensão senoidal, a indução também será senoidal (4.20), tem-se então a expressão (4.21) para as perdas.

$$e = -N \frac{\partial \phi}{\partial t} = -N \frac{\partial (BS)}{\partial t} = -N S \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.19)$$

$$B = B_m \sin \omega t \quad (4.20)$$

$$p_f = \frac{\sigma e^2}{12\rho} (B_m \omega \cos \omega t)^2 \quad (4.21)$$

Utilizando a identidade trigonométrica (4.22) podemos reescrever (4.21) como sendo o valor médio das perdas eletromagnéticas por correntes de Foucault (4.23), para alimentação senoidal, que é a expressão clássica encontrada na literatura para esta parcela das perdas em materiais magnéticos.

$$\cos^2 \omega t = \frac{(1 + \cos 2\omega t)}{2} \quad (4.22)$$

$$p_f = \frac{\sigma e^2}{24\rho} \omega^2 B_m^2 \quad (4.23)$$

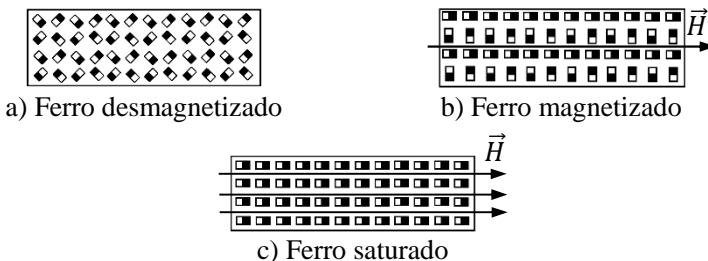
#### 4.9.2 Perda Magnética devido ao Fenômeno de Histerese

Materiais ferromagnéticos possuem um comportamento peculiar quando estão sob a influência de um campo magnético. Quando um núcleo de ferro (Figura 4-14a) se submete a uma intensidade de campo progressivamente crescente, os ímãs elementares giram para orientar-se no sentido do fluxo de linhas de força (Figura 4-14b) (OCARIZ, 1968). Em um dado instante é completa a orientação dos ímãs elementares, a partir de então o núcleo entra no estado magnético que corresponde à saturação do ferro Figura 4-14c.

Reduzindo o valor da intensidade de campo, os ímãs moleculares tendem a girar para sua posição inicial. Sem embargo, apesar de ficar anulada a intensidade de campo, os ímãs elementares não chegam a alcançar a posição neutra impedindo a reorganização das moléculas. A posição tomada pelos ímãs moleculares para um valor nulo da intensidade de campo determina certa magnetização do núcleo, que constitui precisamente o magnetismo remanente.

Invertendo o sentido da corrente na bobina e, em consequência, o sentido da intensidade de campo criado por ela, em um princípio a força magnética se empenha em fazer girar os ímãs moleculares até a posição de ferro neutro. A intensidade de campo necessária para que isto ocorra é precisamente a força coercitiva. Logo, todo o aumento de intensidade de campo se destina a fazer girar os ímãs moleculares em um ou outro sentido correspondente às linhas de força.

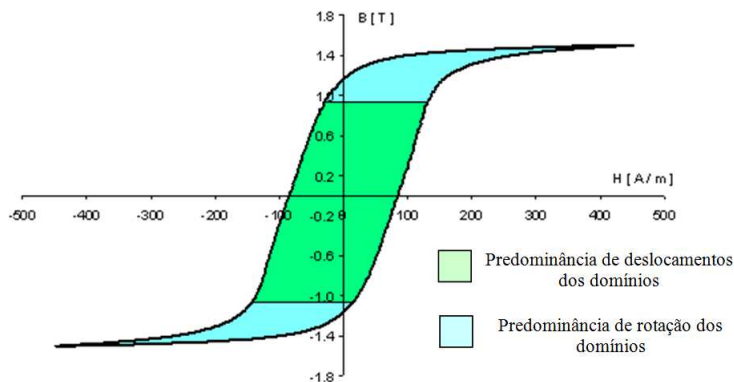
Figura 4-14 – Ímãs elementares



Resumindo o exposto, resulta que os aumentos e reduções da intensidade do campo fazem girar os ímãs moleculares em um ou outro sentido. Dessa forma se verifica o fenômeno da histerese, pelo qual os valores da indução se atrasam em relação à intensidade de campo, sendo

este atraso devido ao atrito das moléculas entre si quando estas giram pela ação do magnetismo (Figura 4-15).

Figura 4-15 – Laço de histerese de um material magnético com caracterização aproximada de suas regiões



Quando a onda de indução magnética  $B(t)$  não possui mínimos locais, as perdas por histerese independem da forma de onda do sinal que está sendo imposto ao sistema, independe também da frequência e da variação do fluxo. Essa parcela das perdas tem relação com o valor máximo da indução de trabalho. A perda de energia no ciclo de histerese se deve ao trabalho necessário para criar, mover, rotacionar e aniquilar os domínios magnéticos durante seu ciclo. Esta parcela de energia despendida não é constante, variando de acordo com a composição química do material analisado, suas impurezas e tamanho de grão, e a faixa de indução de operação.

O cálculo da área do alço de histerese nos fornece toda a energia utilizada para realizar a movimentação das paredes dos domínios magnéticos. Levanta-se a curva de histerese quase estática do material, utilizando uma frequência menor ou igual a 1 Hz. Com esta frequência a parcela de perda devido às correntes induzidas são muito baixas e podem ser desprezadas, sendo assim a histerese a única componente ativa nas perdas. Para outras frequências deve-se calcular a energia do laço e multiplicar pela frequência da onda incidente. Conforme anteriormente comentado, o laço de histerese não depende da forma de onda de indução, podendo ser levantado com qualquer forma de onda. Sendo assim, a perda histerética pode ser calculada utilizando somente o valor máximo da indução  $B_m$ .

Na condição quase estática  $f \rightarrow 0$ , segundo (4.23) não existiriam correntes parasitas. Em (BATISTELA; SADOWSKI, *et al.*, 2002) foi constatado que a energia perdida em uma amostra de material, ensaiado na condição quase estática tende ao valor nulo, isto se justifica uma vez que em regime contínuo não há perda devido ao fenômeno da histerese. No entanto para uma segunda amostra, isto não foi constatado. Conforme (CAMPOS, FALLEIROS e LANDGRAF, 2003), são encontradas correntes parasitas, em torno de paredes de domínio, mesmo nesta condição. Isto pode justificar o fato de que mesmo na condição quase estática, existem perdas por correntes de Foucault.

#### 4.9.3 Perda Anômala, Excedente ou Residual

Quando da investigação dos mecanismos de separação de perdas, observou-se que as perdas calculadas pelo método experimental eram superiores às perdas calculadas por meio de (4.23). A fim de justificar essa diferença, foram concebidas as perdas anômalas. Elas podiam ser calculadas por (4.24).

$$P_a = P_t - P_h - P_p \quad (4.24)$$

As perdas anômalas, excedentes ou residual ainda hoje são motivos de estudos e discussões na literatura internacional. Em (BATISTELA, 2001; BASTOS, BATISTELA, *et al.*, 2006), estas perdas são atribuídas às correntes induzidas criadas pelos movimentos das paredes de domínio, devido à mudança de polaridade do campo de excitação no tempo. Este movimento causa dispêndio de energia. Para Campos, Falleiros e Landgraf (2003) as perdas excedentes tem sua origem nas correntes parasitas existentes em torno das paredes de domínio. Uma outra abordagem dada por Bertotti (1988), defendida também por Lima (2006) sugere a existência de regiões magneticamente ativas ou objetos magnéticos e distribuídas de forma aleatória na seção transversal da amostra. Segundo Campos; Falleiros; Landgraf, (2003) quando uma parede de domínio se move no interior de um grão, ela afeta todos os outros domínios dentro daquele grão. Havendo mudança na estrutura de domínio de um certo grão, esta mudança afetará a estrutura de domínio dos grãos vizinhos. Desta forma não é possível que existam regiões isoladas com comportamento independente (objetos magnéticos).



## 5 ASPECTOS NORMATIVOS DOS ENSAIOS

São em número de quatro as diretrizes normativas que regem os ensaios para a caracterização de materiais magnéticos. Essas diretrizes, bem como a sistemática do ensaio apresentadas pela norma brasileira NBR 5161 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977), a norma da comissão eletrotécnica internacional IEC 404-2 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1996), a norma americana ASTM A343 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1997) e a norma japonesa JIS C2550 (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD, 2000), foram abordadas detalhadamente por (MENDES, 2004).

Algumas características relativas ao estado das amostras e que são importantes para a determinação dos valores de perdas não são sequer mencionadas em algumas normas, como por exemplo o desvio de aplainamento que não é citado nas normas japonesa e americana e que pode afetar o valor de perdas medidas, pelo acréscimo de tensões mecânicas oriundas da disposição das amostras para a realização do ensaio; a quantidade de rebarbas que não é referida na norma americana e que pode acabar provocando uma ligação entre as chapas, arranhando a camada isolante facilitando o contato elétrico entre as amostras.

O trabalho de Mendes (2004) apresenta outras características que não são concordes entre as normas, como por exemplo a quantidade de lâminas. Enquanto a norma japonesa recomenda a utilização da capacidade total do modelo de quadro em uso, as demais apontam para um número mínimo de 12 lâminas, ou seja, três lâminas por braço. Para o uso de uma quantidade maior de lâminas deve-se utilizar múltiplos de quatro.

O uso da capacidade total do modelo do quadro, se por um lado permite a minimização da variabilidade das dimensões individuais da amostra, por outro exige uma maior capacidade de potência da fonte de alimentação que necessita, devido ao aumento da massa a ser ensaiada pelo uso de um maior número de lâminas, fornecer a quantidade de corrente e tensão exigidos no ensaio.

Embora todas as normas afirmem que os valores das perdas medidas são válidos para induções magnéticas senoidais, o que se consegue pelo controle da forma de onda da tensão induzida no enrolamento secundário, elas diferem na forma como este controle é exercido. É sugerido a verificação do fator de forma como controle da validade das medidas de perdas, uma vez que as perdas são função da amplitude da indução magnética. O fator de forma é utilizado como

parâmetro de verificação do teor de distorção da onda medida, é calculado para o valor da tensão no enrolamento secundário do quadro de Epstein e é dado pela razão entre o valor eficaz da tensão induzida e seu valor médio em um semiperíodo entre duas passagens pelo zero (valor médio da semi-onda) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977). O fator de forma pode variar em uma faixa de  $1,11 \pm 1\%$ , não havendo limitação para o ensaio de permeabilidade magnética. Esta faixa de variação deve ser mantida por meio de sistemas eletrônicos realimentados, no caso da inexistência desses, os valores que não respeitarem os limites de variação deverão ser descartados. Esse controle da variação do fator de forma faz-se necessário devido às simplificações realizadas quando da obtenção das expressões para o cálculo da amplitude do campo magnético (5.12) e da indução magnética (5.13).

Quadro 5-1 – Variações nos textos normativos

Item	NBR 5161	IEC 404-2	ASTM A343	JIS C2550	Efeito
Desvio de aplainamento	C	C	NC	NC	Tensões mecânicas
Rebarbas	C	C	NC	C	Perdas Foucault
Quantidade de lâminas	$\geq 12$	$\geq 12$	$\geq 12$	Capacidade do quadro	Variações nas dimensões da amostra
Perdas excedentes	NC	NC	NC	NC	Rendimento
Classe de exatidão dos instrumentos	0,50%	0,10%; 0,20%	0,50%	0,50%	Custo
Massa nos cantos	1 N	200 g	1 N	1 N	Redução na relutância
Inspeção visual	NC	NC	NC	C	Tensões superficiais
Ensaio após desmagnetização	NC	NC	C	NC	Elimina eventuais resíduos

C = Contempla; NC = Não Contempla

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Mendes (2004)

O modelo de separação de perdas atual considera além das perdas por correntes parasitas e as perdas por histerese uma parcela, mais conhecida como perdas excedentes ou anômalas. As normas que tratam

da caracterização de materiais magnéticos referenciam somente as perdas clássicas, ou seja, perdas por correntes de Foucault e perdas por histerese.

Existem diferenças normativas no que tange à instrumentação utilizada no ensaio ora em discussão (MENDES, 2004). A norma IEC 404-2, por exemplo, é a mais rigorosa em termos da classe de exatidão dos instrumentos utilizados (0,1 %, 0,2 %), enquanto a exigência das outras normas é de (0,5 %).

No tocante à medição das perdas magnéticas e da permeabilidade, as normas apresentam semelhanças tanto em termos de circuito quanto em termos de medição das grandezas. Para a medição das perdas utiliza-se a corrente que circula pelo enrolamento primário e a tensão aplicada no enrolamento secundário do transformador. A medição da permeabilidade pode ser conseguida pelo método do resistor calibrado ou pelo método das indutâncias mútuas.

Para a redução da relutância nos cantos da estrutura montada com as chapas no quadro de Epstein, as normas são unânimes em afirmar que há essa necessidade, embora diverjam no método a ser usado. A norma americana estabelece o uso de uma massa de 200 g que deverá ser colocada nos cantos da estrutura, as demais normas recomendam a aplicação de 1 N de força nos quatro cantos do quadro.

Como, na maioria dos casos, o local de preparação das amostras (estamparia) não é o mesmo local onde se farão os ensaios (laboratório), o manuseio cuidadoso das amostras evita a inclusão de tensões superficiais que afetam suas propriedades magnéticas.

Conforme apresentado por Mendes (2004), uma primeira inspeção visual e metrológica da amostra é sugerida pela norma japonesa, que recomenda a análise de rebarbas, a verificação de desvios de corte, planicidade, dobramentos ou amassamentos, uniformidade da largura e comprimento. Em vista do que foi anteriormente exposto, estando alguma dessas características não satisfeita, a amostra pode estar comprometida, portanto deve ser descartada.

As normas são concordes em se utilizar os dois sentidos de laminação nos ensaios, uma vez que isto minimiza o efeito da anisotropia do material. As perdas são menores no sentido longitudinal em comparação com o sentido transversal de laminação. As normas japonesa e americana sugerem a realização do ensaio dividindo a amostra em quatro grupos, sendo dois no sentido PAR ou L e dois no sentido PER ou T ao sentido de laminação.

As propriedades magnéticas são anisotrópicas porque variam com a direção da indução magnética e do campo magnético devido à existência da textura do material e a distribuição não aleatória dos grãos.

No que concerne aos ensaios, a norma americana recomenda a realização do ensaio logo após o procedimento de desmagnetização do material.

## 5.1 A NORMA BRASILEIRA (NBR 5161)

A Norma Brasileira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) contempla um método para a caracterização de aços utilizando quadro de Epstein de 25 cm ou de 50 cm, que abrange todos os tipos de produtos laminados planos de aço para fins elétricos. Apresenta os limites e os parâmetros que devem ser monitorados para a validade dos dados ensaiados, sendo que esses variam de acordo com o tipo de material, com as características da fonte de alimentação do sistema, com os instrumentos utilizados, com o próprio quadro de Epstein e seus elementos construtivos. A norma ressalta o cuidado que se deve ter com a forma da onda de indução do sistema, sugerindo inclusive opções para o controle em malha fechada do sistema. Ela apresenta uma metodologia para a medição das perdas no ferro, a construção da curva de magnetização do material e sugere um procedimento para a separação das perdas nas parcelas clássicas por histeréticas e por correntes parasitas.

### 5.1.1 Instrumentação

Para a caracterização de materiais magnéticos, é necessário o conhecimento da curva de magnetização, também conhecida como curva  $B \times H$ , o valor das perdas apresentadas pelo material magnético quando submetido a certos valores de indução magnética com valores de frequência conhecidos e o valor da permeabilidade do material nas induções de interesse. Para se conhecer o campo e a indução magnética a que está sujeita a amostra sob teste, mede-se o valor de pico da corrente que circula pelo enrolamento primário e o valor médio da tensão induzida no enrolamento secundário do quadro de Epstein.

#### **Medição de corrente**

A medição da corrente pode ser realizada com um amperímetro usual que meça valor eficaz. O instrumento deve possuir baixa resistência interna e classe de exatidão melhor ou igual a 1.

### **Medição de tensão**

Na caracterização de materiais magnéticos é necessário o conhecimento do valor médio e do valor eficaz da tensão induzida. Para a medição do valor médio pode-se utilizar um voltímetro de bobina móvel e retificador. Esses instrumentos devem apresentar classe de exatidão 0,5 ou superior e resistência interna mínima de 1000  $\Omega/V$ . O valor eficaz verdadeiro pode ser medido com um voltímetro com essa capacidade, classe de exatidão de 0,5 ou superior e resistência interna de no mínimo 500  $\Omega/V$ .

### **Medição de frequência**

A norma recomenda utilizar frequencímetro com classe de exatidão superior a 0,5, quando se desejar maior precisão utilizar classe de exatidão 0,2.

### **Medição de potência**

É recomendado utilizar wattímetro de alta sensibilidade, com classe de exatidão 0,5 ou melhor e que possua resistência do circuito de tensão  $\leq 100 \Omega/V$ .

### **Medição do fator de forma**

O fator de forma ( $FF$ ) é utilizado para fornecer uma ideia da deformação da forma de onda de tensão induzida no enrolamento secundário do quadro de Epstein. É calculado pela relação entre o valor eficaz e o valor médio da tensão induzida (5.1). A correção das perdas pelo fator de forma obedece a critérios pré-estabelecidos.

$$FF = \frac{\text{Valor eficaz}}{\text{Valor médio}} \quad (5.1)$$

## **5.1.2 Quadro de Epstein**

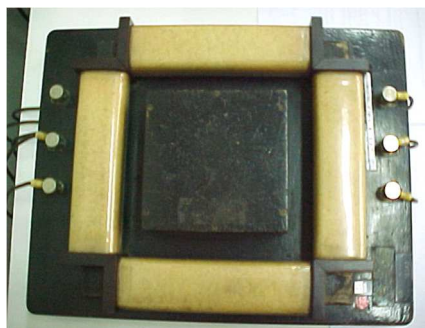
Uma forma de caracterizar materiais magnéticos é realizar o levantamento da curva de magnetização, bem como medir as perdas do material com tensão imposta. O Quadro de Epstein (Figura 5-1) é um dos dispositivos utilizado para realizar o levantamento das características magnéticas de chapas de aço utilizadas na confecção de rotores e estatores de motores e também na fabricação do núcleo de transformadores. O quadro assemelha-se a um transformador com núcleo de ar. O material que se deseja caracterizar é inserido dentro dos enrolamentos fechando o circuito magnético.

O quadro consiste em dois enrolamentos, cada um dos quais constituídos de quatro bobinas ligadas em série que, juntamente com o

núcleo, formam o circuito magnético. As bobinas são montadas em quatro carretéis de material isolante duro os quais suportam duas bobinas concêntricas. A bobina externa faz parte do enrolamento primário a qual constitui o enrolamento de excitação, e a bobina interna o secundário, a qual constitui o enrolamento de medição de tensão. Os carretéis são fixados sobre uma base de material não magnético e não condutor, formando um quadrado.

O emprego do Quadro de Epstein abrange todos os tipos de produtos laminados planos de aço para fins elétricos. Neste sistema é possível analisar algumas características magnéticas das chapas de aço, dentre elas o levantamento da curva de magnetização, a determinação da permeabilidade relativa do material e as perdas no ferro.

Figura 5-1 – Quadro de Epstein



O ensaio consiste em se aplicar uma tensão no enrolamento primário do quadro e realizar a leitura de potência e tensão no secundário. Em cada um dos métodos de medição descritos posteriormente, são especificados os limites de indução que asseguram a validade do ensaio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977). Esses limites dependem do tipo do aço, das características da fonte, dos instrumentos utilizados, do Quadro de Epstein e do indutor mútuo utilizado para a compensação do fluxo de dispersão. Em Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977) encontram-se os aspectos construtivos do Quadro de Epstein bem como as relações entre os diversos parâmetros que maximizam a sua performance.

### 5.1.3 Corpo de Prova

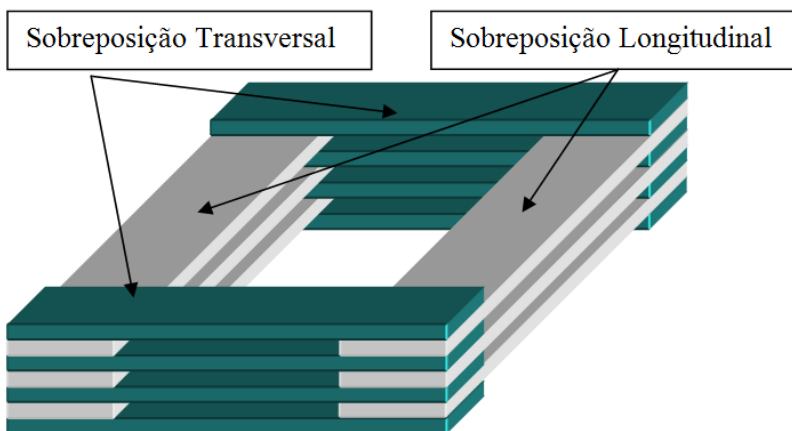
Os corpos de prova são confeccionados utilizando-se a bobina de aço, onde se estampa um conjunto de 42 lâminas necessárias para os ensaios. Desse conjunto, 20 lâminas são cortadas no sentido longitudinal ao sentido de laminação e 20 lâminas no sentido transversal. Das duas lâminas restantes uma é utilizada para calcular a densidade do material  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>] e a outra é descartada.

$$\rho = 7,865 - 0,065 (\%Si + 1,7 \%Al) \quad (5.2)$$

Onde %Si e %Al representam respectivamente o percentual do teor de silício e alumínio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977; LANDGRAF, TEIXEIRA; RODRIGUES, 2002).

A colocação das lâminas no quadro de Epstein obedece a uma disposição normalizada, em que nos braços paralelos do quadro são colocadas as lâminas que possuem um sentido de laminação, conforme pode ser observado na Figura 5-2.

Figura 5-2 – Posicionamento das lâminas no quadro de Epstein.



Fonte: Bork, Carvalho e Stringari (2011)

### 5.1.4 Cálculo das Perdas

Em Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977) é apresentada uma metodologia para a separação de perdas baseada no método das duas frequências. Este método não calcula o valor das componentes das perdas estáticas e dinâmicas (5.3), ele realiza a separação das perdas totais ( $P_c$ ) [W] medidas em duas componentes, sendo que uma varia com a primeira potência da frequência e a outra varia com a segunda potência da frequência.

$$P_c = A_h B_m^x f + A_p B_m^2 f^2 \quad (5.3)$$

Onde  $A_h$  constante do material relacionada com as propriedades de histerese é função do volume do corpo-de-prova,  $A_p$  representa a constante do material e está relacionada com as correntes de Foucault a qual depende do volume do corpo de prova e do quadrado da espessura da lâmina e  $f$  a frequência do sinal aplicado [Hz].

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977), os métodos experimentais são desenvolvidos a fim de proporcionar uma avaliação prática de determinado fenômeno. Observando-se as limitações do ensaio, no que tange a forma de onda senoidal e à exatidão das medições do fator de forma, a correção das perdas medidas (5.4) “[...] fornece uma correção adequada sob todas as condições práticas” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977).

$$P_{cc} = \frac{P_t}{K_h + K_p \left( \frac{FF}{1,11} \right)^2} \quad (5.4)$$

$$K_p = \frac{P_p}{P_{cc}} \quad (5.5)$$

$$K_h = \frac{P_h}{P_{cc}} \quad (5.6)$$



A perda total do corpo de prova corrigida  $P_{cc}$  [W], dada pela equação (5.4), considera que  $P_t$  são as perdas totais da amostra medida [W],  $K_p$  é a relação entre as perdas dinâmicas e as perdas totais medidas para fluxo senoidal (5.5),  $K_h$  a relação entre as perdas estáticas e as perdas totais medidas para fluxo senoidal (5.6), observar que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977) considera somente duas componentes de perdas, sendo assim a soma de  $K_h$  com  $K_p$  é igual a 1.

Na equação (5.4) é mostrada a correção das perdas totais pelo fator de forma da onda de tensão induzida. A parcela relativa às perdas dinâmicas é corrigida devido à sua dependência do valor eficaz da tensão. A parcela das perdas estáticas não sofre influência do fator de forma da onda, desde que se possa obter o valor de pico da indução magnética.

É recomendado que se realizem ensaios de perdas para valores de frequência que variem entre a metade e o dobro da frequência desejada. Em Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977) é apresentada uma descrição teórica para a obtenção das duas parcelas das perdas e posteriormente um processo analítico para o seu cálculo (APÊNDICE A).

### 5.1.5 Separação das Perdas Totais em Estáticas e Dinâmicas

Dividindo-se a equação (5.3) pela frequência de ensaio tem-se a equação (5.7). No ensaio de perdas por frequência, a indução é mantida constante ( $\hat{B}$ ), logo, a equação (5.7) pode ser comparada com a equação da reta quando se relaciona o termo  $P_c/f$  com a  $f$ , conforme pode ser observado na Figura 5-3.

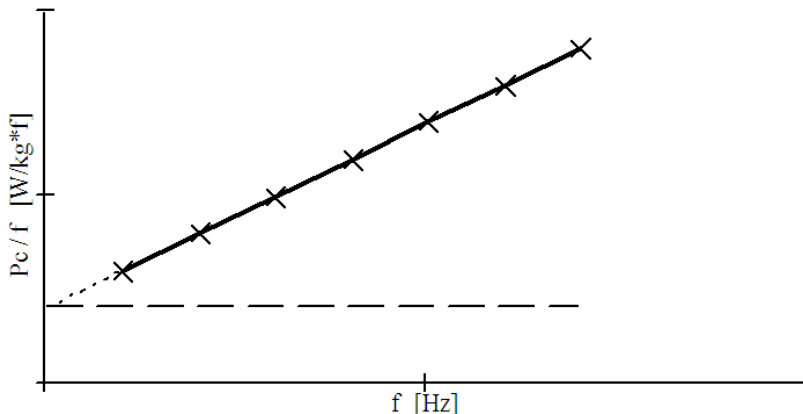
$$\frac{P_c}{f} = A_h B_m^x + A_p B_m^2 f \quad (5.7)$$

O termo  $tg^{-1} (A_p B_m^2)$  corresponde ao coeficiente angular desta reta e da intersecção da reta com o eixo das ordenadas obtêm-se o termo  $A_h B_m^x$ . Ao multiplicarmos estes termos pela frequência obtemos as parcelas relativas às componentes de perdas dinâmicas ou parasíticas (5.8) e estáticas ou histeréticas (5.9) respectivamente.

Com os valores das perdas separadas pode-se calcular a proporção das perdas dadas em (5.5) e (5.6).

No decorrer deste trabalho, este foi o método adotado para o cálculo das parcelas referentes às perdas dinâmicas e estáticas.

Figura 5-3 – Reta para a determinação da separação de perdas



Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1977)

$$P_p = A_p B_m^2 f^2 \quad (5.8)$$

$$P_h = A_h B_m^x f \quad (5.9)$$

### 5.1.6 Curva de Magnetização

A curva de magnetização dos materiais é representada pelos valores de pico da indução magnética e do campo magnético. A amplitude do campo magnético é obtida a partir da amplitude da corrente primária. Para a medição desta última, a norma brasileira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) sugere a utilização dos métodos do resistor *Schunt* ou da indutância mútua. O primeiro método calcula a amplitude da corrente primária medindo-se a amplitude da tensão em um resistor calibrado e o segundo através da medição da tensão no enrolamento secundário de um indutor mútuo.

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (5.10)$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (5.11)$$

Partindo-se das equações de Maxwell para um meio material, a lei de Ampère (5.10) e a lei de Faraday (5.11) obtêm-se as equações do campo magnético máximo (5.12) e da indução magnética (5.13).

$$H_m = \frac{N I_m}{l} \quad (5.12)$$

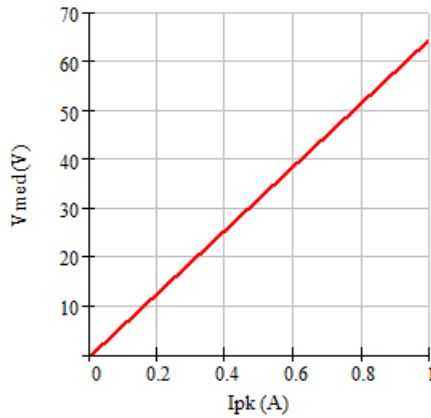
$$B_m = - \frac{\sqrt{2} \cdot e_{ef}}{2\pi \cdot f \cdot S} \quad (5.13)$$

### 5.1.7 Método da Indutância Mútua

O cálculo da amplitude máxima do campo magnético é obtido utilizando o valor médio da tensão medida no enrolamento secundário do indutor, que está em série com o circuito primário do quadro de Epstein (Figura 6-3). Neste circuito, o voltímetro utilizado para medir a tensão secundária do quadro de Epstein é o mesmo que mede a tensão do indutor mútuo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977; MENDES, 2004).

O diagrama característico que relaciona a tensão média no secundário do indutor mútuo com a corrente de pico que circula pelo primário deste mesmo indutor, a relação  $V_{med} \times I_{pk}$  é fornecido pelo fabricante dos indutores (Figura 5-4). Por possuir um comportamento linear, o valor da corrente de pico é obtida por (5.14), possibilitando o cálculo do valor máximo do campo magnético (5.12). Devido às amplitudes das correntes que circulam pelo circuito primário, a bancada em questão utiliza dois indutores, sendo o indutor L1 para amplitudes de corrente entre 0 e 1 A e o indutor L2 para valores de 1 a 10 A.

Figura 5-4 – Característica do Indutor



Fonte: Yokogawa Electric Works Ltd, ([19--]).

$$I_m = \frac{V_{med}}{K} \quad (5.14)$$

Dependendo do aço que está sendo caracterizado, é possível atingir induções da ordem de 1,6 T com o indutor de 1 A. Nos aços não siliciosos, estas induções só poderiam ser atingidas com campos maiores, consequentemente, correntes mais elevadas.

### 5.1.8 Cálculo da Permeabilidade

Uma vez calculado os valores da curva de magnetização, pode-se obter a permeabilidade na região de interesse, pela equação (5.15) que relaciona a indução magnética máxima com o campo magnético de pico.

$$\mu = \frac{B_m}{H_m} \quad (5.15)$$

## **6 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO**

Neste capítulo são apresentados três sistemas para a caracterização de materiais magnéticos, sendo dois com controle em malha aberta (um analógico e outro digital), e um com controle em malha fechada. São discutidos aspectos relativos às características principais, especificação da fonte de alimentação e procedimentos de ensaio. Os diagramas de bloco e os esquemas de ligação também são apresentados.

O processo para a caracterização de aços elétricos é composto, basicamente, pelo quadro de Epstein, dispositivo padrão normalizado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977), em conjunto com um sistema de geração, controle e medição de sinais de tensão e corrente aplicados aos terminais do quadro de Epstein.

### **6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO**

#### **6.1.1 Etapa 1: Inspeção Visual**

Antes da realização do ensaio propriamente dito, é realizada uma inspeção visual nas amostras, observando características como desvio de aplainamento, planicidade, amassamentos ou deformações mecânicas, rebarbas, que afetam a caracterização da amostra. As amostras que não são aprovadas nesta inspeção visual são descartadas e novas amostras são solicitadas.

#### **6.1.2 Etapa 2: Análise Laboratorial**

Após a inspeção visual, são retiradas duas lâminas, uma de cada sentido de laminação. Uma das lâminas é descartada e a outra é enviada ao laboratório para a determinação da composição química, por meio da análise espectral e verificação de tamanho de grãos, pela microscopia óptica. Com os resultados da composição química, calcula-se a densidade do material (5.2), as amostras são pesadas e verificadas suas dimensões, comprimento, largura e espessura.

#### **6.1.3 Etapa 3: Desmagnetização da Amostra**

Antes de se realizar o ensaio recomenda-se (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) que se faça a

desmagnetização das amostras, a fim de se evitar que erros originários da estampagem, manuseio e devido a proximidade de elementos magnetizantes que possam alterar as características magnéticas da amostra, influenciando nos resultados da medição.

No processo de desmagnetização aplica-se tensão no enrolamento primário do quadro de Epstein até que a corrente atinja o valor máximo que o quadro suporta, no caso em questão 10 A, reduzindo-se a tensão, em seguida, gradativamente até zero.

#### **6.1.4 Etapa 4: Caracterização de Materiais Magnéticos**

Para a caracterização de materiais magnéticos é necessário que se conheça o campo e a indução magnética, para a construção da curva de magnetização, a corrente do circuito e a tensão induzida para o cálculo das perdas devido ao material magnético. O campo é calculado pela medição da corrente que circula no enrolamento primário do quadro de Epstein (5.12), a indução magnética é obtida através da tensão induzida no enrolamento secundário do sistema (5.13). Para que se obtenha o valor das perdas no ferro do material que está sob teste é necessário a medição da corrente no enrolamento primário e da tensão no enrolamento secundário do quadro.

### **6.2 SISTEMA ANALÓGICO EM MÁLHA ABERTA (SAMA)**

Em geral as normas apresentam as técnicas que devem ser empregadas para a realização dos ensaios. Sendo assim, não indicam qual a tecnologia a ser utilizada, mas sim como se deve fazer para a realização dos ensaios.

No decorrer deste capítulo, é descrito um método que, devido à sua estrutura funcional e operacional, foi designado como Sistema Analógico em Malha Aberta (SAMA).

#### **6.2.1 Características Principais**

O SAMA é formado por um conjunto de equipamentos como geradores, motores, instrumentos de medição, painel de controle e alguns outros componentes específicos. Essa interligação possibilita a realização de ensaios customizados em termos de indução, campo magnético, perdas e frequência. Destacam-se como vantagens o baixo custo de manutenção e de calibração uma vez que, estas ações podem ser programadas para serem efetuadas de forma independente

possibilitando a continuidade da realização dos ensaios, pela substituição temporária dos equipamentos.

Em contrapartida, por tratar-se de um sistema analógico com controle em malha aberta, há a necessidade da verificação pontual dos valores obtidos para a validação da medição realizada. Outra desvantagem que o sistema possui é a necessidade da intervenção de um laboratorista na operação manual dos instrumentos. Tanto o ajuste dos valores de tensão aplicada quanto os valores lidos dos instrumentos de medição são realizados de forma manual, obedecendo a procedimentos normalizados internamente na empresa. Sendo assim, na pior das hipóteses, o valor lido de tensão pode não corresponder ao valor lido de corrente, se eventualmente ocorrer variação do sinal da fonte entre os instantes de leitura de tensão e corrente, caracterizando um ponto de trabalho diferente ao que foi previamente calculado. Esta não simultaneidade tanto no ajuste quanto na leitura dos valores desejados pode ser parcialmente contornada, quando o ensaio é realizado por um experimentado laboratorista, ou pode ser dirimida, conforme a necessidade, quando realizada por duas ou mais pessoas.

### **6.2.2 Especificação da Fonte de Alimentação**

O ensaio para a obtenção da curva de magnetização do material deve ser realizado na frequência de 60 Hz (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) dessa forma é possível utilizar a própria rede de alimentação do laboratório ou, na impossibilidade deste, um gerador dedicado. Especificamente neste ensaio, a fim de se eliminar toda e qualquer interferência oriunda do sistema de alimentação da bancada, utilizava-se a solução com o gerador dedicado. O sistema de alimentação composto por um gerador trifásico de 30 kVA, 400 V, 43,3 A, acionado por um motor de indução trifásico 12,5 cv, 220/380 V, 34/20 A. Todo o sistema de alimentação ficava confinado na casa de máquinas por questões de segurança e praticidade de manutenção (Figura 6-1 a)).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977) estabelece que os ensaios para a obtenção das perdas de origem magnética devem ser realizados em quatro frequências distintas. Para selecionar essas frequências era utilizado um sistema de alimentação composto por um gerador CA de 4 kVA, 110/220 V, 36/18 A a 1800 rpm acoplado a um motor CC monofásico de 5 kW, 260 V / 24,8 A e 2500 rpm, controlado por um conversor CC/CC para o ajuste da frequência do gerador CA (Figura 6-1 b)).

Figura 6-1 – Fontes de alimentação do SAMA, para a os ensaios de caracterização de materiais magnéticos



a) Alimentação em 60 Hz

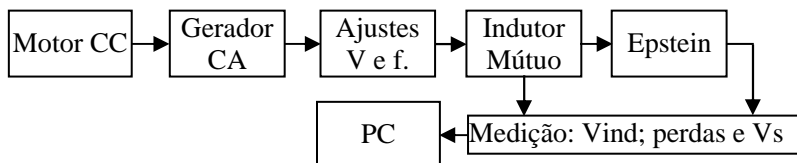


b) Alimentação em outras frequências.

### 6.2.3 Diagrama de Blocos

Na Figura 6-2 é apresentado o diagrama de blocos do SAMA, onde não existe praticamente nenhuma automação no processo de ensaio. O sistema, como um todo, possui uma forma mais amigável para o tratamento das informações depois que estas estiverem no programa de banco de dados. Embora seja um sistema em malha aberta, atende a normalização vigente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) em todos os critérios estabelecidos.

Figura 6-2 – Diagrama de blocos do SAMA



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Carvalho *et al.* (2006)

O sistema realiza a medição da corrente do enrolamento primário de forma indireta utilizando o método da indutância mútua (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977;

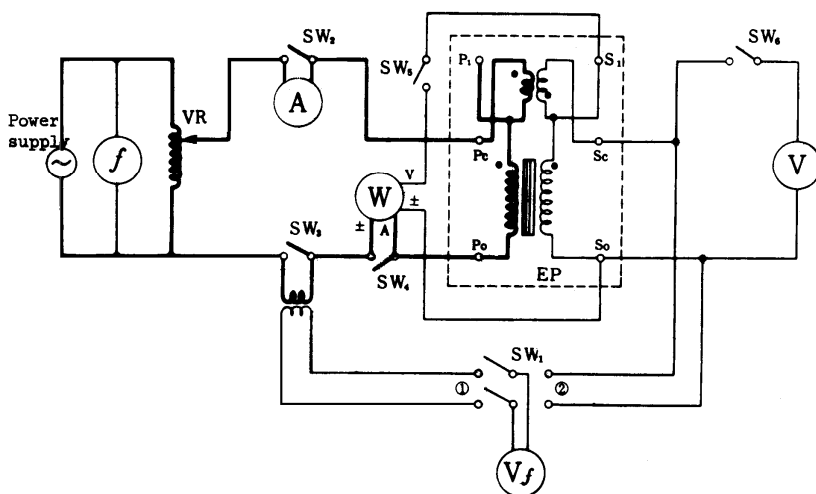


CARVALHO; SOBRINHO *et al.*, 2006), abordado anteriormente no capítulo 5 item 5.1.7.

## 6.2.4 Esquema de Ligação

O esquema de ligação do SAMA, apresentado na Figura 6-3, leva em consideração a utilização do voltímetro de fluxo, também conhecido como voltímetro de valor médio, tanto na medição da tensão nos enrolamentos do indutor como a medição nos terminais do enrolamento secundário do quadro de Epstein, pela chave  $SW_1$ .

Figura 6-3 – Circuito esquemático da bancada analógica



Fonte: Yokogawa Electric Works Ltd., ([19--])

A instrumentação utilizada na Figura 6-3, é composta por voltímetro de fluxo ( $V_f$ ) de 1000  $\Omega/V$ , voltímetro de valor eficaz ( $V$ ) de 200  $\Omega/V$ , wattímetro monofásico ( $W$ ) de baixo fator de potência, freqüencímetro ( $f$ ), reostato ( $VR$ ) utilizado como divisor de tensão, quadro de Epstein ( $EP$ ) de 25 cm. Os instrumentos utilizados devem possuir classe de exatidão mínima de 0,5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977).

Na Figura 6-4 é apresentada a estrutura física da bancada do SAMA bem como a disposição da instrumentação, composta por: 1) Quadro de Epstein de 25 cm, 2) Freqüencímetro, 3) Wattímetro monofásico, 4) Voltímetro de valor eficaz, 5) Voltímetro de fluxo, 6)

Amperímetro de valor eficaz, 7) Indutância mútua, 8) Sistema de controle da operação da bancada de ensaio e 9) Reostato para o controle da tensão do gerador CA (60 Hz).

Figura 6-4 – Bancada do SAMA para caracterização de materiais magnéticos



### 6.2.5 Procedimento de Ensaio

O ensaio para a montagem da curva de magnetização é realizado pela variação gradativa da amplitude da tensão aplicada no enrolamento primário do quadro de Epstein. A cada ajuste de tensão, são anotados os valores lidos pelo voltímetro de fluxo, tanto no enrolamento primário, no secundário do indutor mútuo, como no secundário, nos terminais do enrolamento. Posteriormente esses valores são convertidos para os valores de campo e indução magnética, respectivamente.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977), a corrente no enrolamento primário do quadro de Epstein pode ser medida de duas formas distintas. Utilizando-se um resistor “shunt” calibrado ou utilizando o método da indutância mútua. O sistema apresentado na Figura 6-3 utiliza o método da indutância mútua em que um conjunto de indutores, para 1 A e para 10 A, são ligadas em série com o enrolamento primário do quadro de Epstein.

A diferença de potencial existente no enrolamento secundário da indutância mútua é proporcional à corrente que circula no enrolamento

primário dessa indutância, sendo assim a medição da corrente é realizada de forma indireta. A tensão necessária para o cálculo da indução magnética é obtida diretamente nos terminais secundário do enrolamento. Esta tensão é medida utilizando-se um voltímetro de fluxo que indica o valor médio retificado da forma de onda da tensão aplicada.

Este ensaio demanda tempo, uma vez que, para cada incremento no valor da corrente é necessária uma leitura no valor de tensão medida no enrolamento secundário.

Outro fator que comumente ocorre é referente ao ajuste da tensão aplicada ao quadro de Epstein quando do ensaio de magnetização do material. Os valores são calculados previamente para que se tenha a indução desejada, dessa forma, ajusta-se o valor da tensão antes de cada leitura. Pode acontecer de se ajustar a tensão para um valor superior ao calculado, caracterizando uma indução superior a que se deseja. Dependendo da posição, na curva de magnetização, que se aplicou um valor de tensão maior do que o calculado, a análise dos resultados pode ser comprometida por faltar a informação referente àquela indução. Nesses casos, conclui-se o ensaio em andamento, realiza-se a desmagnetização do material e aplica-se novamente a tensão referente à indução que não foi medida.

Para se obter uma curva de magnetização que represente o comportamento do aço realiza-se o ensaio com 30 valores de tensão. Para a medida das perdas magnéticas utilizam-se cinco valores de indução (0,8; 1,0; 1,2, 1,5 e 1,7 T) medidos em quatro frequências distintas (40; 50; 60; 67,5 Hz). Todos os valores são ajustados e registrados manualmente. O procedimento completo de ajuste e registro do ensaio com o SAMA é apresentado no Apêndice D e E.

Em função dessa série de detalhes, o tempo médio de ensaio para a caracterização magnética de um conjunto de amostras de chapas de aço é de aproximadamente setenta minutos, considerando que já estejam disponíveis as informações de densidade e massa das amostras e que o ensaio seja realizado por um laboratorista experiente na utilização da bancada.

### **6.2.6 Medição das Perdas**

A medição das perdas é realizada por um wattímetro (Figura 6-3), que possui a bobina de corrente ligada no enrolamento primário do quadro de Epstein e a bobina de tensão conectada no enrolamento secundário, segundo apontado por Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977). Os valores da potência útil ( $P_{util}$ ) consumida pela

amostra são calculados por (6.1), onde  $P_i$  é a potência [W] consumida pelos instrumentos, FMI o fator de multiplicação do instrumento e  $P_W$  o valor das perdas medidas no wattímetro.

$$P_{util} = (P_W FMI) - P_i \quad (6.1)$$

O valor do FMI é função da seleção das escalas utilizadas durante a realização do ensaio. A Quadro 6-1 apresenta os valores de FMI onde EVW representa a escala do voltímetro do wattímetro, EIW a escala do amperímetro do wattímetro.

Quadro 6-1 – Fatores de conversão de escala para o wattímetro

EVW	30	30	60	60	120	120	240	240
EIW	0.2	1.0	0.2	1.0	1.0	5.0	1.0	5.0
FMI	0.01	0.05	0.02	0.10	0.20	1.00	0.40	2.00

Fonte: Yokogawa Electric Works Ltd, ([19--]).

Pode-se observar no cálculo das perdas no ferro  $P_{fe}$  dadas em watts [W], equação (6.2), a correção pelo quadrado do  $FF$  (5.1) realizada na parcela das perdas por correntes parasitas ( $ep$ ) devido às distorções da forma de onda de tensão induzida no enrolamento secundário do quadro de Epstein.

$$P_{fe} = \frac{100 P_{util}}{h + FF^2 ep} \quad (6.2)$$

Este cálculo é realizado com base nos dados fornecidos pelo fabricante do quadro de Epstein que utiliza uma proporção pré-definida para os índices de perdas por histerese ( $h$ ) e por Foucault ( $ep$ ), conforme apresentado no Quadro 6-2.

Na caracterização de materiais magnéticos é utilizado o valor das perdas expresso em W/kg, o que permite um cálculo rápido das perdas no ferro dos equipamentos com base nos dados da massa do material ativo do dispositivo.

Na equação (6.3) tem-se em  $m'$  o valor efetivo da massa do corpo de prova dado em gramas [g],  $M$  massa total do corpo de prova em gramas [g],  $l$  é o comprimento efetivo do circuito magnético dado em centímetros [cm],  $L$  o comprimento do corpo de prova em centímetros [cm] e o número quatro que representa os quatro braços do quadro de Epstein.

$$m' = \frac{M \cdot l}{4 \cdot L} \quad (6.3)$$

Quadro 6-2 – Percentual das perdas por Histerese e Foucault

Material	Sentido de laminação	Espessura									
		0,30		0,35		0,50		0,60		0,70	
		<i>h</i>	<i>ep</i>	<i>h</i>	<i>ep</i>	<i>h</i>	<i>ep</i>	<i>h</i>	<i>ep</i>	<i>h</i>	<i>ep</i>
GNO	Somente longitudinal	-	-	-	-	65	35	60	40	55	45
	50% long. e 50% transv.	-	-	-	-	70	30	65	35	60	40
GO (silício)	100% long.	50	50	40	60	-	-	-	-	-	-

Fonte: Yokogawa Electric Works Ltd , ([19--]).

A equação (6.4) é a equação (6.2) reescrita em termos da equação (5.1) e (6.3) apresentada em watts por quilograma [W/kg].

$$Pfe = \frac{100 P_{util}}{h + \left(\frac{Urms}{Uf}\right)^2 ep} \frac{1}{m'} \quad (6.4)$$

## 6.2.7 Determinação da Curva de Magnetização e Permeabilidade Magnética

### Curva de Magnetização

Para a determinação da curva de magnetização são necessários os valores de pico da intensidade de campo magnético ( $H_{pk}$ ) e de indução de campo magnético ( $B_{pk}$ ). Esses valores são obtidos seguindo o procedimento de ensaio descrito no Apêndice E. A intensidade de campo magnético em [Ae/cm] é dada por (6.5) e é estabelecida por (5.12) com base nos valores médios da tensão aplicada  $V_{med}$  e os valores de  $K$  do Quadro 6-3, referentes à característica dos indutores, fornecidos pelo fabricante do quadro de Epstein. Os valores de indução de pico dados em Tesla [T], estabelecidos em (5.13), são calculados em (6.6) considerando o número de espiras ( $N_2$ ) do enrolamento secundário do quadro de Epstein. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1977) o quadro de 25 cm possui enrolamento primário e secundário com 700 espiras e o comprimento médio do circuito magnético ( $l$ ) a ser considerado para efeitos de cálculo é de 94 cm.

$$H_m = \frac{7,45 V_{med}}{K} \quad (6.5)$$

$$B_m = - \frac{V_{med}}{4.44 .N_2 .f .S} \quad (6.6)$$

Quadro 6-3 – Valores de K

f (Hz)	Indutor	
	1 A	10 A
50	54	4,1
60	65	4,9

Fonte: Yokogawa Electric Works Ltd, ([19--]).

### Permeabilidade Magnética

O valor da permeabilidade magnética de interesse (5.15) é a que o material apresenta na indução magnética de 1,5 T, isto porque além de ser uma condição real de trabalho do material magnético, é nesta indução que os fabricantes de materiais apresentam os dados de catálogo.

A permeabilidade magnética relativa (6.7) indica quanto um determinado material é mais permeável em relação ao vácuo. É dada pelo quociente entre a permeabilidade do material ( $\mu$ ) e a permeabilidade magnética no vácuo ( $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$  T.m/A).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6.7)$$

## 6.3 SISTEMA DIGITAL EM MALHA ABERTA (SDMA)

O sistema proposto foi construído tendo como objetivo principal o incremento da qualidade dos ensaios pelo ajuste automático dos níveis de tensão necessários e a aquisição simultânea dos sinais de interesse. Aliado ao ganho de produtividade está o incremento da confiabilidade e repetitividade dos ensaios executados. Trabalhando nesse sentido, foram elaboradas as especificações do sistema para que pudesse atender os pré-requisitos desejados.

### 6.3.1 Características Principais

O sistema proposto apresenta os tópicos abaixo como características principais, contribuindo para um aumento na qualidade dos serviços prestados pelo laboratório às demais áreas da empresa.

- a) Incremento na confiabilidade dos dados ensaiados;
- b) Instantaneidade/ simultaneidade na aquisição dos dados;
- c) Repetibilidade,
- d) Diminuição do tempo de ensaio,
- e) Minimizar a intervenção do operador

O sistema final é composto basicamente por uma fonte de alimentação CA, um microcomputador com placa de aquisição de dados, um quadro de Epstein padronizado e um *software* para o controle do ensaio com injeção e aquisição dos sinais necessários para as análises. Um diagrama de blocos simplificado é apresentado na Figura 6-5.

Vantagens: possibilidade de customização de ensaios, baixo custo de manutenção e calibração dos componentes do sistema, ajuste automático dos sinais aplicados, leitura simultânea dos valores medidos, tempo de ensaio reduzido, possibilidade de visualização de formas de onda medida e/ou calculada (tensão e corrente, indução e campo magnético, curva de magnetização, laço de histerese, permeabilidade, entre outros) e eliminação da casa de máquinas com redução de espaço, quantidade de equipamentos e chamadas de manutenção para os sistemas de alimentação.

Desvantagens: sistema de controle em malha aberta, custo extra para a manutenção da fonte, que deve ser realizada pelo fornecedor.

### 6.3.2 Especificações da Fonte

Baseado nas solicitações de melhoria iniciou-se um processo de procura de fornecedor externo. Critérios como exigências normativas, custo do equipamento, tempo de entrega, pós venda e assistência técnica nortearam a seleção de fornecedores da fonte. Algumas fontes foram testadas e outras avaliadas a nível de catálogo. Em função das especificidades do sistema idealizado, as fontes avaliadas não atenderam plenamente aos critérios estabelecidos. A solução para este impasse veio da possibilidade do trabalho em conjunto com um grupo de engenheiros que se propuseram a desenvolver uma fonte específica que atendesse

todos os critérios estabelecidos. Esta proposta foi vista positivamente uma vez que abria outra possibilidade até então não aventada que era a possibilidade da interatividade no desenvolvimento da fonte.

Outros fatores que influenciaram na escolha do fornecedor foram: custo do equipamento, tempo de entrega, pós venda, assistência técnica, *start up* do sistema e interatividade. Esse, por sua vez, foi um dos fatores que mais pesou na escolha do fornecedor da fonte, uma vez que o processo de ensaio que estávamos modificando dependia em grande parte da instrumentação e do conhecimento do equipamento.

A fim de que atendesse às necessidades impostas, as seguintes especificações foram relacionadas:

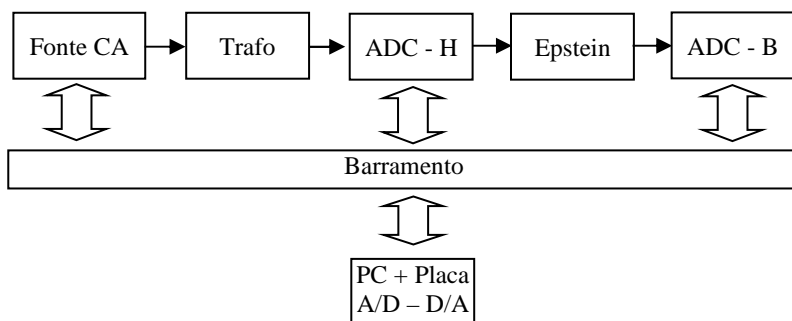
- a) A fonte CA seria utilizada em ensaios de chapas ferromagnéticas a serem aplicadas em motores ou transformadores,
- b) A fonte deveria permitir o ajuste da amplitude e frequência de saída entre os valores de 0 a 100 Volts (valor eficaz) e entre 30 a 120 Hertz,
- c) Capacidade de corrente de saída da fonte deveria ser de até 10 Ampères (valor eficaz),
- d) O sinal de entrada de referência seria gerado por *software* de controle, deveria ser um sinal limitado entre os valores de +/- 10 Volts (pico) e frequência máxima de 150 Hertz.
- e) Permitir o acesso aos sinais analógicos proporcionais à tensão e corrente de entrada e tensão de saída,
- f) A alimentação da fonte CA seria realizada por uma rede monofásica de 220 Volts 60 Hertz,
- g) Fonte com isolamento galvânico da rede, e
- h) Proteção contra curto-circuito na rede.

### 6.3.3 Diagrama de Blocos

É apresentado na Figura 6-5 o diagrama de blocos do sistema automático. A bancada é um sistema que funciona em malha aberta atendendo aos requisitos normativos vigente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977). O usuário ativa o sistema por meio de um *software* de controle em um microcomputador. Este *software* controla a fonte de alimentação do quadro, aplicando o sinal de tensão na amplitude e frequência desejada e realiza a leitura das formas de onda de tensão e corrente nos bornes do quadro de Epstein.



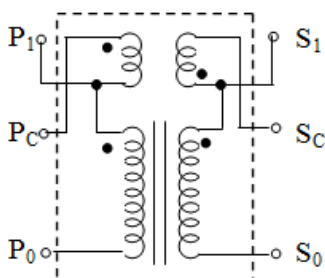
Figura 6-5 – Diagrama de blocos do sistema automático



### 6.3.4 Esquema de Ligação

São apresentadas, na Figura 6-6, as conexões do quadro de Epstein, onde a tensão aplicada  $VP_C-VP_0$ ; a tensão induzida nos enrolamentos de saída do quadro, após a bobina de compensação  $VS_C-VS_0$ , a tensão induzida utilizada para o cálculo das perdas  $VS_1-VS_0$  e a corrente no enrolamento primário, terminais  $Pc-P_0$ , necessária para atingir o campo magnético desejado, são igualmente medidas pelo sistema.

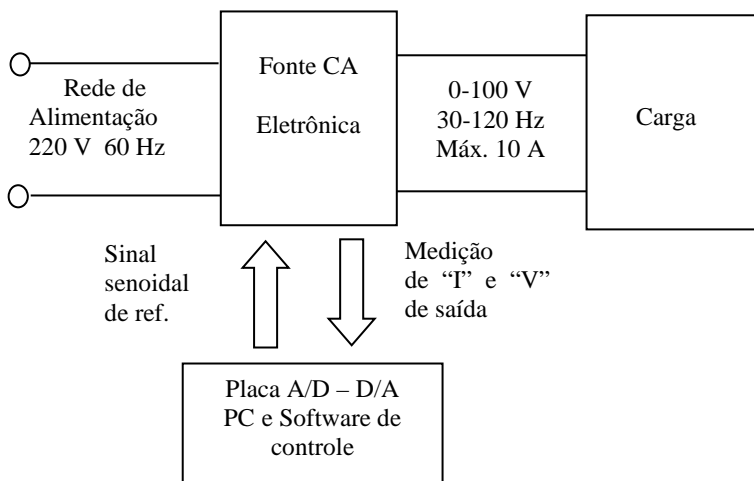
Figura 6-6 – Circuito esquemático do quadro de Epstein



Fonte: Editado pelo autor com base em Yokogawa Electric Works Ltd, ([19--]).

Um esquema de ligação simplificado com as configurações de tensão e frequência é apresentado na Figura 6-7.

Figura 6-7 - Esquema simplificado da bancada automática



Fonte: Editado pelo autor baseado em Supplier Projetos em Engenharia Elétrica LTDA, (2004).

Elementos componentes da bancada automática para a caracterização de materiais magnéticos:

1. Fonte CA
2. Quadro de Epstein
3. *Software* para o controle, imposição e medição dos sinais
4. Transformador especial

O quadro de Epstein foi o único componente que foi utilizado do Sistema Analógico de Malha Aberta, todos os outros componentes foram desenvolvidos para atender às solicitações da nova proposta de medição do Sistema Digital em Malha Aberta.

Por ser estruturado de forma modular, o SDMA é um sistema de fácil mobilidade, o que, de certa forma, é desejável em equipamentos laboratoriais. Esta portabilidade permite que o sistema possa ser utilizado em outros ambientes que não somente o de laboratório, como por exemplo no departamento de estamparia, para contribuir na identificação das bobinas ou a seção de suprimento facilitando as ações de inspeção e controle de qualidade dos materiais.

Figura 6-8 – Bancada automática para a caracterização de materiais magnéticos.



### 6.3.5 Procedimento de Ensaio

Para a realização do ensaio no sistema proposto, o usuário necessita basicamente de um treinamento na preparação das amostras para ensaio e na operação do *software* de controle da fonte CA.

A preparação das amostras consiste em estampar 21 lâminas no sentido longitudinal ou paralelo ao sentido de laminação e 21 lâminas no sentido transversal ou perpendicular ao sentido de laminação da bobina de aço. As amostras sem processamento e semi-processadas são encaminhadas ao tratamento térmico e posteriormente ao laboratório. As amostras totalmente processadas seguem diretamente para o laboratório. O procedimento laboratorial consiste em separar uma lâmina para a determinação da composição química do material, teores de carbono, enxofre, alumínio, silício e manganês. Com a composição química, calcula-se a densidade da amostra (5.2), dado de entrada para o sistema de ensaio. As amostras são então pesadas, recebem um registro de inspeção (RI) e preparadas para o ensaio.

O operador insere as amostras no quadro de Epstein, aciona o *software* de controle e o sistema realiza o ensaio. Para a realização da caracterização são utilizados como entrada de dados o RI, a densidade

do material, a massa total medida, o comprimento e largura da amostra e o número de lâminas.

O procedimento de ensaio consiste em uma etapa de desmagnetização da amostra e medição das perdas em até quatro frequências. O quadro de Epstein tolera uma corrente eficaz máxima em torno de 10 A. O *software* de ensaio monitora o valor da corrente e interrompe o ensaio quando a corrente ultrapassa o valor de controle estipulado.

Ao final do ensaio os dados medidos são gravados em um arquivo texto para posteriormente alimentar o banco de dados de aços elétricos.

### 6.3.6 Medição das Perdas

A grande vantagem do novo sistema é que a aquisição de dados se dá de forma automática e simultânea, proporcionando uma medição mais realista das grandezas.

Todo o controle da bancada é realizado pelo *software* LabView<sup>2</sup>, que utiliza funções próprias ou programáveis para realizar ações específicas, denominadas de Instrumentos Virtuais (VIs). As VIs são utilizadas no controle da fonte de corrente, aquisição de dados, manipulação de arquivos de entrada e saída, configurações de parâmetros, *setup* do sistema, tratamento de dados, cálculo de grandezas, geração de relatórios, telas para a interação com o usuário e interface para representação dos dados.

Todas as VIs estão inter-relacionadas de forma que depois de iniciado o processo, o sistema se encarrega de todos os passos para a caracterização, não havendo necessidade da intervenção do laboratorista.

Durante a execução a caracterização os dados são mostrados na tela em tempo real, dessa forma, é possível acompanhar o andamento do ensaio, observando-se o que está sendo executado, bem como interrompê-lo no caso de alguma eventualidade ou emergência.

Os valores máximo e eficaz da corrente, no enrolamento primário do quadro de Epstein, e os valores médio e eficaz da tensão induzida, no enrolamento secundário, são calculados com base nas respectivas formas de onda adquiridas por meio de sensores de efeito Hall. Em (CARVALHO, SOBRINHO, *et al.*, 2006) os autores realizaram

---

<sup>2</sup> Marca registrada da National Instruments

comparações satisfatórias entre valores de corrente obtidos utilizando a medição direta, medidas com sonda de efeito Hall e indireta, por meio de indutores, da corrente no enrolamento primário do quadro de Epstein.

As equações (6.8) e (6.9) são utilizadas para o cálculo do valor eficaz ( $x_{rms}$ ) e valor médio ( $x_{med}$ ) de qualquer forma de onda, onde  $T_1$  e  $T_2$  são os instantes inicial e final da forma de onda considerada.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f(t)^2 dt} \quad (6.8)$$

$$x_{med} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f(t) dt \quad (6.9)$$

O valor da potência no aço é calculado pela multiplicação instantânea da corrente que flui pelo enrolamento primário do quadro de Epstein ( $ip(t)$ ) pela tensão induzida no enrolamento secundário ( $vs(t)$ ), conforme equação (6.10).

$$P_{fe} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} ip(t) vs(t) dt \quad (6.10)$$

A medição das perdas é realizada por um *software* específico desenvolvido especialmente para esta finalidade (Figura 6-9). O programa gerencia a imposição e leitura dos sinais necessários ao cálculo das grandezas para a caracterização de materiais magnéticos.

Uma vez adquiridas as formas de onda dos sinais do quadro, são calculados os valores médio (6.9) e eficaz (6.8) das tensões e correntes e as perdas (6.10) do material testado.

Todos os dados medidos são armazenados em um arquivo dentro de um diretório pré-configurado pelo programa. A cada atualização dos dados de ensaio é realizado uma cópia de segurança na rede.

Os dados da amostra a ser ensaiada são inseridos na tela apresentada na Figura 6-10 a), que é aberta quando se pressiona o botão INICIAR da Figura 6-9.

Na guia “Tempo de Aquisição”, Figura 6-10 b, são inseridos os intervalos de tempo para realizar a desmagnetização do material (Tempo 1 (s)) e a medição das grandezas do ensaio (Tempo 2 (s)).

Figura 6-9 – Tela de abertura do *software* para caracterização de materiais magnéticos



Havendo necessidade de se realizar o ensaio com uma maior precisão de resultados, pode-se alterar o tempo de aquisição dos dados, montando as curvas com um maior número de pontos por curva.

Foram realizados testes variando-se o intervalo de medição desde um milissegundo até 20 segundos. Observou-se que acima do tempo de um segundo os resultados praticamente não sofriam variação significativa, dessa forma optou-se por manter o tempo de um segundo como padrão. Na configuração final uma caracterização completa tem duração de aproximadamente 12 minutos para ser realizada.

Na Figura 6-11 é apresentada a tela do procedimento de desmagnetização da amostra. É aplicada uma corrente eficaz de 10 A. Esta corrente é então reduzida gradativamente até zero, com o intuito de eliminar todo e qualquer magnetismo residual que possa vir a existir na amostra, oriundo do manuseio, processamento anterior ou até mesmo devido ao contato com outras fontes de magnetização durante o percurso da fabricação da amostra até a entrada no laboratório.

Figura 6-10 – Entrada de dados do *software* de ensaio

**Dados de Entrada**

POR FAVOR, ENTRE COM OS DADOS DO ENSAIO

Configuração      Tempo de Aquisição

RI  
ru707par

Peso Específico (g/cm<sup>3</sup>)  
7,85

Massa da Chapa (g)  
652

Comp. Tira (m)  
0,280

Larg. Tira (m)  
0,030

Nº Laminas  
20

Frequências  
120  
110  
70  
60

**Dados de Entrada**

POR FAVOR, ENTRE COM OS DADOS DO ENSAIO

Configuração      Tempo de Aquisição

Tempo 1 (s)  
5,0

Tempo 2 (s)  
1,0

a) Guia configuração

b) Guia tempo de aquisição

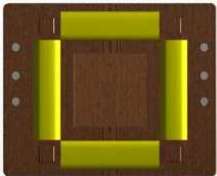
Após o processo de desmagnetização, é realizada a magnetização do material utilizando a primeira frequência que foi solicitada, Figura 6-10 a. Durante o processo de magnetização das amostras (Figura 6-12) é realizada a medição das perdas no ferro. Este processo se repete até que todas as frequências selecionadas sejam ensaiadas.

Figura 6-11 – Procedimento de desmagnetização da amostra

**Software Ensaio da Curva BxH.vi**

Dados de Ensaio      Gráficos      Valores      Parâmetro de Controle

**CURVA B x H**



Mensagem  
Desmagnetização  
Aguarde...

Dados de Entrada

RI  
ru1407per

Peso Específico (kg/m<sup>3</sup>)  
7750

Massa da Chapa (kg)  
0,648

Massa da Etilveia (kg)  
0,543057

Comp. Tira (m)  
0,280

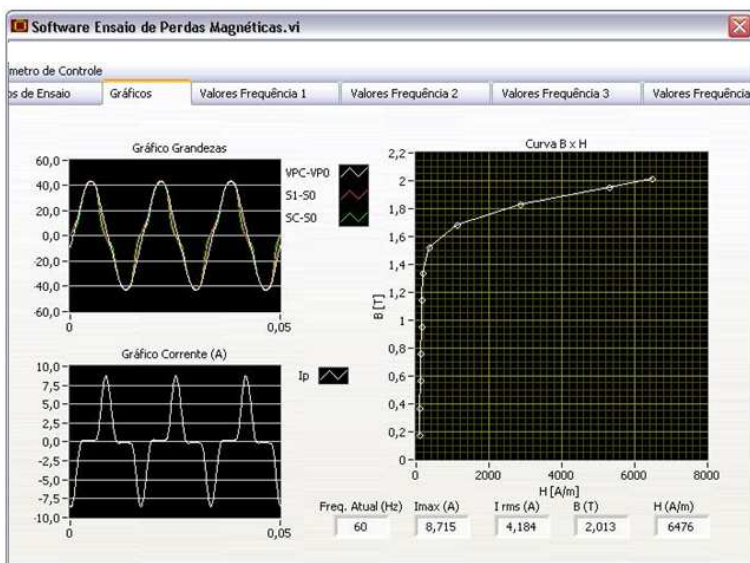
Larg. Tira (m)  
0,030

Nº de Laminas  
20

Frequências  
60  
70  
110  
120

Neste ensaio, pode-se observar a curva de magnetização da amostra, as tensões aplicadas ao quadro e a corrente induzida no sistema. Ainda podem ser observados os valores da frequência de ensaio, o valor máximo e eficaz da corrente circulante no quadro, bem como os valores de pico da indução e campo magnético.

Figura 6-12 – Ensaio para a medição de perdas magnéticas



Durante a realização do ensaio, os dados medidos instantaneamente são armazenados em uma planilha Figura 6-13.

Após o término do ensaio todas as quatro planilhas são gravadas em um único arquivo que será utilizado posteriormente para inserir os dados no programa de banco de dados de aços elétricos. Também são registrados neste arquivo os dados referentes aos tempos de início e término do ensaio, bem como os dados de entrada da amostra Figura 6-10 a.

Existe ainda uma etapa posterior, realizada manualmente, em que o laboratorista faz uma cópia de segurança dos arquivos que estão no computador para a rede da empresa, onde diariamente é realizado um *back up* dos arquivos existentes.





apresenta, como por exemplo o desconhecimento dos aspectos técnicos envolvidos na medição das grandezas, as soluções tecnológicas adotada no sistema, o alto custo de manutenção e calibração fazem com que a decisão acerca da adoção deste sistema passe por uma análise criteriosa.

#### 6.4.2 Especificação da Fonte

Os componentes principais da bancada do GRUCAD podem ser vistos na Figura 6-14. À esquerda do gabinete do computador pode ser localizado o quadro de Epstein, ao lado do monitor está o equipamento para ensaio em chapa única (SST). A fonte do sistema pode ser vista debaixo da mesa de ensaios, do lado esquerdo. No lado direito estão alguns terminais utilizados para acompanhamento das medições.

Por ser uma bancada comercial, detalhes dos procedimentos inerentes à determinação das variáveis medidas não são conhecidos. Tão pouco são apresentadas particularidades do cálculo das grandezas, aspectos construtivos do sistema e considerações referentes às diversas variantes de cálculo. Entretanto na documentação da bancada é informado que ela atende à norma internacional IEC 60404-2 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1996), utilizada na caracterização de materiais magnéticos.

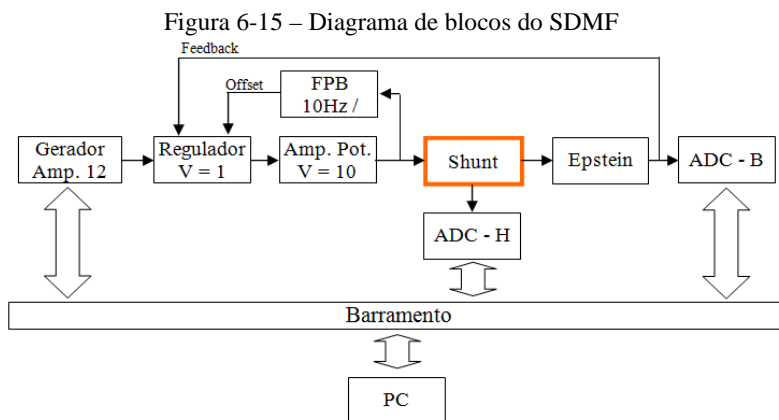
Figura 6-14 – Bancada de Referência do GRUCAD.



Fonte: Meurer, Garcia, *et al.* (2004)

### 6.4.3 Diagrama de Blocos

Na Figura 6-15 é apresentado o diagrama de blocos do SDMF que possui uma fonte interna exclusiva para o fornecimento da corrente do enrolamento primário do quadro de Epstein. A medição da corrente é realizada por meio de um resistor de precisão (shunt). O sistema de malha fechada é concebido para realizar o auto ajuste instantâneo da corrente para que a tensão induzida no enrolamento secundário do Epstein seja mantida senoidal. O sistema comercial da Brockhaus possui duas malhas de controle em laço fechado, sendo um dos laços responsável pelo controle da forma de onda de tensão induzida no enrolamento secundário do quadro de Epstein, supervisão do fator de forma da onda induzida, e outro para o ajuste do nível “offset” da corrente do enrolamento primário, fazendo com que o valor médio da corrente primária seja nulo.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Meurer, Garcia, *et al.* (2004).

### 6.4.4 Procedimento de Ensaio

Consiste em inserir as amostras no quadro de Epstein e entrar com a sequência de medidas que se deseja em um arquivo. O *software* do quadro controla os valores que devem ser aplicados e lidos, calcula

as grandezas de interesse e gera um arquivo de saída no formato “.xls” que pode ser lido pelo programa Excel ®<sup>3</sup>.

#### 6.4.5 Medição das Perdas

As perdas são medidas e calculadas por meio de rotinas e procedimentos internos não divulgados pelo fornecedor do equipamento. O fornecedor apenas garante que o equipamento realiza os ensaios segundo a IEC (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1996) na qual também é contemplada pela norma brasileira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977).

#### 6.5 BANCO DE DADOS DE AÇOS ELÉTRICOS

Todos os ensaios realizados no laboratório são armazenados em um banco de dados eletrônico. Devido à necessidade de se manter a compatibilidade com o sistema manual, optou-se por montar o banco de dados separado do *software* para a caracterização de aços elétricos. Desse modo, o *software* de controle realiza o ensaio e os dados são armazenados na forma de arquivos “.txt” e “.xls” no diretório corrente de ensaio. Como procedimento de segurança estes arquivos são movidos para um diretório no qual são realizadas cópias de segurança (*back up*) para garantir o armazenamento e integridade dos dados.

O banco de dados de aços elétricos foi programado em Visual Basic 6.0 ®<sup>4</sup> e o *software* de controle para a realização dos ensaios utiliza o *software* LabView ®<sup>5</sup>.

---

<sup>3</sup> Marca registrada da Microsoft Corporation.

<sup>4</sup> Visual Basic 6.0 é marca registrada da Microsoft Corporation

<sup>5</sup> LabView é marca registrada da National Instruments.

## 7 MATERIAL E MÉTODOS

Tomando como referência orientativa a estrutura de ensaio do SAMA, projetou-se o SDMA para realizar a caracterização de materiais magnéticos.

Este sistema deveria atender especificações técnicas e comerciais. Dentre as de cunho técnico estavam a realização do ensaio de forma automática, a aquisição direta dos sinais de interesse e a simultaneidade das medições, sendo esta última a de maior grau de importância. No que diz respeito às especificações comerciais o sistema deveria possuir baixo custo e facilidade de manutenção.

Para atender aos requisitos técnicos foi realizado todo um trabalho de desenvolvimento junto a um fornecedor de fontes de potência. Dessa forma a fonte foi projetada e fabricada sob medida para atender as especificações solicitadas. A solução proposta atendeu as necessidades a um custo relativamente baixo, uma vez que a contrapartida do fabricante da fonte foi a evolução, teste e otimização das soluções técnicas para atender as nossas necessidades e solicitações.

Para atender as características comerciais optou-se por utilizar pessoal da própria empresa para a escrita do *software* de controle do SDMA. Dessa forma, o sistema foi sendo gradativamente construído, testado e ajustado. Exceto as etapas de desenvolvimento da fonte, que foram realizadas no fabricante, todas as outras etapas tiveram a coordenação e/ou acompanhamento do autor, principalmente as que diziam respeito ao processo de controle, aquisição de dados e cálculo das grandezas de interesse. Uma vez terminada a fase de montagem do sistema, foram iniciados os testes para a validação do SDMA.

### 7.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram segregadas oito amostras de aços para fins elétricos (Quadro 7-1), sendo sete constituídas por aços de diversas classes, formas de processamento e fornecedores. O material identificado como A8, referenciado doravante como material de referência, era uma amostra que possuía certificado de calibração do Inmetro (FUKUHARA, LANDGRAF e YONAMINE, 2004) com suas propriedades definidas e que era utilizada para verificar e atestar a calibração do processo de ensaio. As amostras foram caracterizadas na empresa e posteriormente no GRUCAD.

Os ensaios para a validação da bancada foram realizados em um sistema comercial independente (MPG 100 D <sup>6</sup>), que atende às recomendações normativas para a caracterização de materiais magnéticos vigentes no mercado brasileiro e tido por fabricantes de aço, clientes e instituições de pesquisa como um sistema de referência internacional. O GRUCAD possui esse sistema e neste trabalho ele foi utilizado como o sistema de referência para a comparação e validação dos resultados obtidos com o SDMA. Uma melhor descrição deste equipamento é apresentada no item 6.4 deste trabalho.

Quadro 7-1 – Amostras utilizadas na validação dos ensaios

Código	Fornecedor	Classe	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Espessura [mm]
A1	A	1006	7,85	0,60
A2	B	50A800*	7,85	0,50
A3	A	Core	7,80	0,50
A4	B	50A470*	7,75	0,50
A5	C	50A470*	7,75	0,54
A6	C	50A400*	7,75	0,50
A7	D	50A400*	7,70	0,50
A8	Desc.**	50A470	7,70	0,50

\* Nomenclatura segundo a norma japonesa JIS 2552 (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD, 2000).

\*\* Desconhecido

Os sistemas discutidos no capítulo 6 apresentam formas distintas para o cálculo da separação de perdas, o SAMA e o SDMA seguem os requisitos da norma brasileira NBR 5161 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977), o SDMF utiliza procedimento próprio embora não detalhado pelo fornecedor do equipamento. Sendo assim, optou-se por comparar os diferentes sistemas utilizando o procedimento de separação de perdas apresentado pela norma brasileira, que embora não contemple a parcela das perdas excedentes ou anômalas pode ser obtida diretamente dos dados de ensaio em no mínimo em duas frequências, conforme apresentado no item 5.1.4.

Para cada amostra caracterizada no SDMA, foi calculada a separação de perdas segundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE

---

<sup>6</sup> Sistema comercial fornecido pela Brockhaus Messtechnik GmbH – República Federal da Alemanha

NORMAS TÉCNICAS, 1977) e comparado os resultados com os ensaios realizados no SDMF, procedendo-se assim à validação dos resultados quando estes se encontravam dentro das tolerâncias pré-estabelecidas, conforme Quadro 7-2.

Quadro 7-2 – Tolerâncias admitidas na validação dos resultados

Ensaio	Tolerâncias (em relação ao medido no SDMF)
Perdas [W/kg] em 60 Hz	$\pm 5\%$
Faixa de indução de interesse: de 1,0 a 1,7 T	$\pm 5\%$
Permeabilidade em 1,5 T	$\pm 10\%$

A obtenção dos valores de permeabilidade magnética é diferente nos dois sistemas em estudo, enquanto que no SDMF os valores de indução que se deseja medir é um dado de entrada para o processo de caracterização que compara os valores atingidos com os valores especificados e depois realiza as medições, no SDMA são estipulados os tempos de ajuste e aquisição e o sistema incrementa as amplitudes de corrente e realiza as medições. Dessa forma, o SDMF calcula a permeabilidade na indução solicitada, neste caso 1,5 T, desde que isto tenha sido solicitado pelo usuário do sistema. O SDMA na maioria das vezes atinge valores muito próximos de 1,5 T, podendo em alguns casos até atingir exatamente este valor, em todos os ensaios, independente da solicitação do usuário. Quando a indução medida não coincidir com o valor de 1,5 T, faz-se uma interpolação quadrática, utilizando os valores inferiores e superiores obtidos no ensaio.

Para o tratamento dos dados foi utilizado o *software* Excel<sup>7</sup>, por possuir funções estatísticas e devido a familiaridade do autor no manuseio do programa.

Todos os valores obtidos nos ensaios do SDMA e SDMF, foram organizados, tabulados e preparados para a realização dos cálculos necessários para a análise da caracterização desenvolvida individualmente para cada uma das amostras.

Por meio da projeção linear (7.1) foi utilizado o método de "mínimos quadrados" para calcular uma linha reta que melhor se ajustasse aos dados obtidos nos ensaios.

---

<sup>7</sup> Software de propriedade da Microsoft Corporation

$$y = mx + b \quad (7.1)$$

A precisão dessa linha calculada é função do grau de dispersão dos dados. Quanto mais lineares forem os dados, mais preciso será o modelo encontrado. A inclinação da reta, dada por  $m$ , é calculada por (7.2) e o ponto de intersecção no eixo das ordenadas, dados por  $b$  é obtido segundo (7.3).

$$m = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2} \quad (7.2)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (7.3)$$

Onde:

- x : é a média dos valores conhecidos de x;
- y : é a média dos valores conhecidos de y;

### **Considerações relativas ao material de referência**

O material de referência foi incluído na lista de amostras ensaiadas uma vez que ele é utilizado para a avaliação periódica da bancada de caracterização. A amostra, composta por dois conjuntos de lâminas (PER e PAR) foi caracterizada em ensaio realizado pelo laboratório do “Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris” (IEN-Itália), tornando possível estabelecer a rastreabilidade dos resultados à um dos mais importantes centros de pesquisas de aços elétricos do mundo (FUKUHARA, LANDGRAF e YONAMINE, 2004).

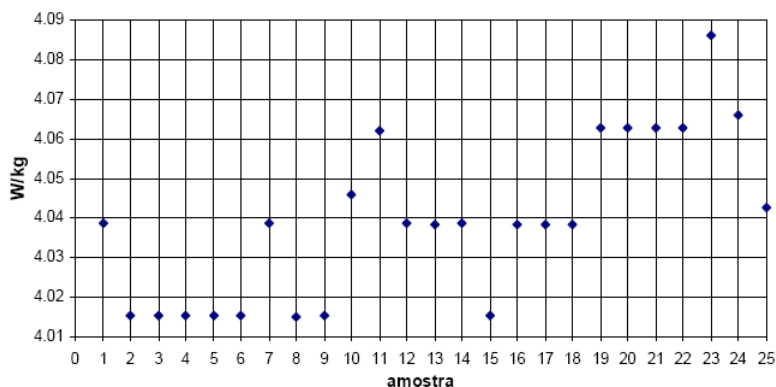
A iniciativa da criação do material de referência para o controle de qualidade dos sistemas de caracterização de materiais magnéticos surgiu no Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos (LMPMM) da Divisão de Metalurgia (DIMET) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) (FUKUHARA, LANDGRAF e YONAMINE, 2004).

A Figura 7-1 apresenta a variação das perdas medidas em 25 corpos de prova (conjuntos de 16 lâminas) da mesma bobina de aço elétrico. Todas as amostras foram cortadas no sentido transversal ao sentido de laminação, a fim de reduzir as variações de espessura dos



corpos de prova. As perdas medidas nas lâminas paralelas ao sentido de laminação são mais elevadas que as apresentadas. As caracterizações foram realizadas com o sistema Brockhaus MPG100D, utilizando um quadro de Epstein de 25 cm com 700 espiras no Laboratório de Magnetismo (LAMAG) da Divisão de Materiais (DIMAT) no INMETRO (FUKUHARA, YONAMINE e MISSEL, 2006)

Figura 7-1 – Perdas das amostras de referência



Fonte: Fukuhara, Landgraf e Yonamine (2004)



## 8 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização de materiais magnéticos em amostras previamente segregadas. São confrontados os valores testados no SDMA em relação aos valores encontrados no SDMF.

O SDMA foi exaustivamente ajustado para que sua performance pudesse atingir os níveis de tolerância previamente especificados Quadro 7-2.

### 8.1 DESEMPENHO DO SISTEMA

O objetivo principal da automação do processo de medição estava em aumentar a produtividade da caracterização de materiais magnéticos melhorando a qualidade dos ensaios. Isto foi atingido observando-se os cinco pontos principais, a saber:

- a) leitura simultânea dos sinais de interesse;
- b) diminuição do tempo de ensaio;
- c) repetibilidade;
- d) qualidade dos resultados e
- e) alimentação do banco de dados.

Os itens a) e e) foram alcançados quando da concepção do sistema, onde os sinais de interesse são lidos de forma simultânea pela placa de aquisição e os dados medidos são armazenados em arquivo tipo texto (.txt) que posteriormente é lido pelo programa de banco de dados. A redução do tempo de ensaio, item b), também foi alcançada, uma vez que o tempo de aproximadamente 70 minutos caiu para um valor em torno de 10 minutos por amostra. A tolerância de repetitividade ficou abaixo de 3% nas induções de interesse. Para a avaliação da qualidade dos ensaios, item d) os dados ensaiados no sistema proposto foram comparados com os dados obtidos no sistema de referência, levando-se em consideração a tolerância estabelecida na Quadro 7-2.

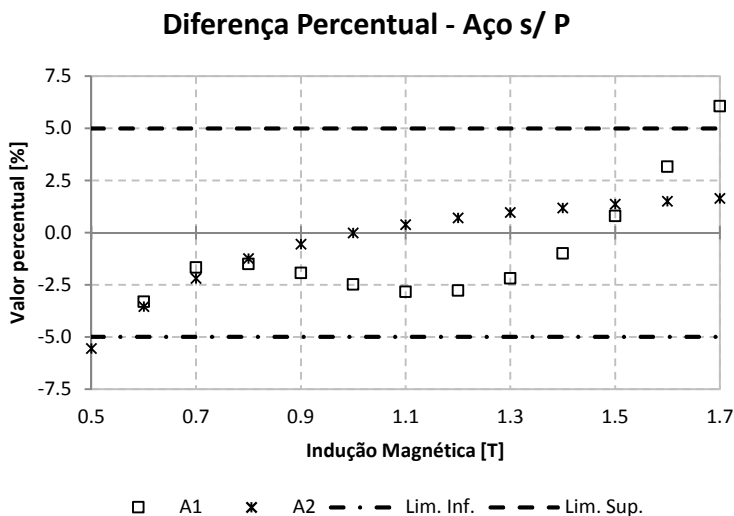
### 8.2 PERDAS TOTAIS MEDIDAS

As diferenças percentuais, em relação ao sistema de referência, para cada valor de medição das perdas totais na frequência de 60 Hz são apresentadas nesta seção. Os valores foram agrupados em três grupos que relacionam os aços sem processamento (s/ P), compreendendo as

amostras A1 e A2, os aços semiprocessados (SP), com a amostra A3 e finalmente, os aços totalmente processados (TP) que englobam as amostras A4 a A8.

A diferença percentual dos valores de perdas medidos para os aços sem processamento é apresentado na Figura 8-1. Observa-se que na região de interesse, entre as induções de 1,0 T a 1,7 T, praticamente todos os valores encontram-se dentro da tolerância desejada, sendo que para esta classe de material o sistema poderia admitir, conforme necessidade, uma tolerância mais conservadora com dois e meio pontos percentuais menor do que a inicialmente estipulada, para uma faixa de induções entre 1,0 T e 1,6 T.

Figura 8-1 – Variação da diferença percentual medida em relação aos valores de referência aço sem processamento

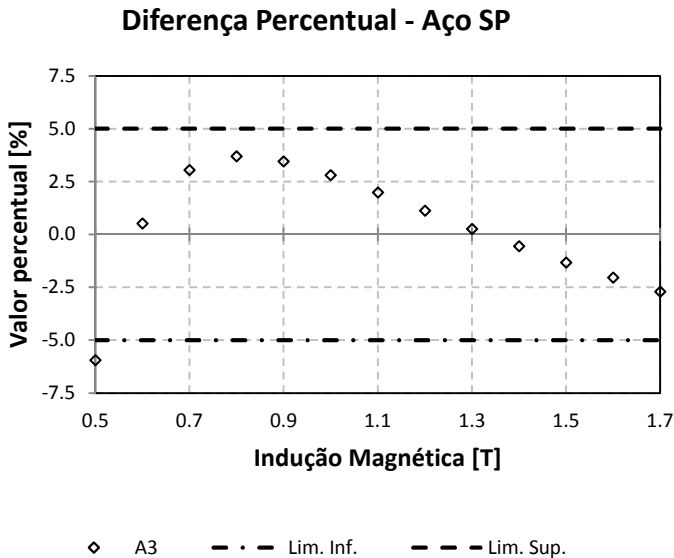


Este comportamento é diferenciado quando se trata de induções abaixo de 0,5 T ou acima de 1,6 T, conforme a tendência dos dados apresentados. Abaixo de 0,5 T os valores medidos tendem a ser mais elevados que os valores de referência, esse comportamento está relacionado com a acuidade na medição da corrente que circula pelo enrolamento primário do quadro de Epstein e que é utilizada na determinação das perdas do material magnético.

Acima de 1,6 T os valores de referência tendem a ser mais elevados que os valores medidos. Conforme visto anteriormente o SDMF possui um controle em malha fechada que monitora constantemente a forma de onda do sinal de tensão induzida no enrolamento secundário do quadro de Epstein, ou seja, o fato de forma da onda induzida é constantemente ajustado para o valor normalizado de 1,11. No SDMA esse controle não acontece, sendo assim, na medida em que o valor de indução magnética aumenta, a forma da onda da tensão induzida vai se distorcendo, aumentando o fator de forma e consequentemente diminuindo a área útil sob a onda de tensão. Dessa forma para o cálculo da perda do material, que leva em conta o valor instantâneo de tensão e corrente, conforme equação (6.10), o valor da perda é inferior ao valor calculado pelo sistema de referência.

Comportamento semelhante do sistema é encontrado nos aços semiprocessados, conforme se verifica na Figura 8-2, onde a tolerância estabelecida é atendida com relativa facilidade.

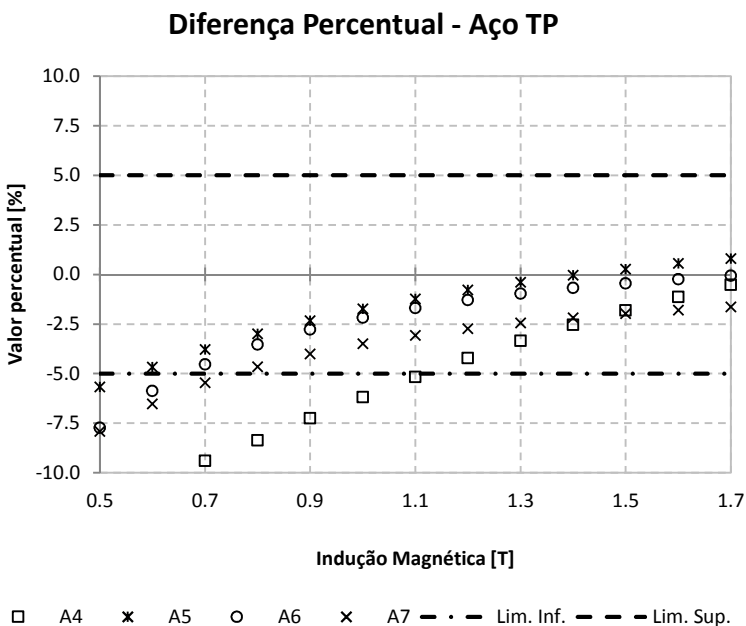
Figura 8-2 - Variação da diferença percentual medida em relação aos valores de referência aço semiprocessado



No que tange às perdas nos aços totalmente processados, embora a diferença percentual calculada, para a região de interesse, esteja dentro

da tolerância estipulada, pode-se observar Figura 8-3 que o comportamento do sistema de medição é distinto das outras duas classes de aços. Pelo fato desta classe de aço possuir, devido às suas características intrínsecas, perdas inferiores às outras duas classes, a intensidade da corrente de magnetização necessária para atingir a indução de trabalho é menor.

Figura 8-3 – Variação da diferença percentual medida em relação aos valores de referência aço totalmente processado



Nesse caso, as diferenças percentuais em relação aos valores de referência tendem a diminuir na medida em que há uma maior acuidade na determinação da intensidade da corrente de magnetização devido ao seu incremento nas induções superiores.

### 8.3 SEPARAÇÃO DE PERDAS

Neste item são apresentados os valores calculados das perdas totais (Pt) e da separação de perdas nas componentes de histerese (Ph) e Foucault (Pf), para as diferentes amostras, segundo ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1977).

A nomenclatura utilizada designa por Pt\_W, Ph\_W e Pf\_W as perdas totais, perdas por histerese e perdas por correntes parasitas obtidas pelo método normalizado, respectivamente, utilizando o SDMA, desenvolvido e montado na empresa e Pt\_B, Ph\_B e Pp\_B as mesmas perdas obtidas no sistema de referência, ou seja, no SDMF de propriedade da UFSC.

Para a validação do SDMA foram utilizados os valores medidos neste sistema e comparados com os valores medidos no SDMF, conforme apresentado anteriormente. O método de separação de perdas, normalizado foi um estudo adicional realizado com o intuito de fornecer ferramentas adicionais para a análise do comportamento dos materiais sob diferentes regimes de trabalho, portanto, para este estudo não foram estabelecidos critérios de tolerância para os valores encontrados conforme foi feito com os valores de perdas medidos diretamente pelos dois sistemas.

Conforme comentado anteriormente, o SDMF possui método próprio para o procedimento de separação de perdas, sendo assim, para que se pudesse realizar uma comparação entre os dois sistemas optou-se por aplicar o método descrito pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1977) para ambos os sistemas, desconsiderando os cálculos de separação de perdas realizados previamente pelo SDMF.

A fim de facilitar a interpretação dos resultados, iremos apresentá-los individualmente, mas comentá-los conforme as classes apresentadas anteriormente. Na classe dos aços TP tendo em vista que tratamos com dois níveis de perdas distintos, faremos as análises separadamente.

As amostras identificadas por A1 e A2, pertencem à classe dos aços sem processamento e, portanto, possuem perdas da mesma ordem de grandeza, conforme pode ser observado na Figura 8-4 e na Figura 8-5.

Figura 8-4 – Perdas totais da amostra A1

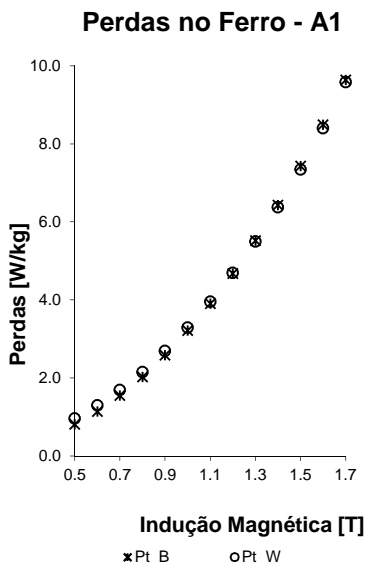
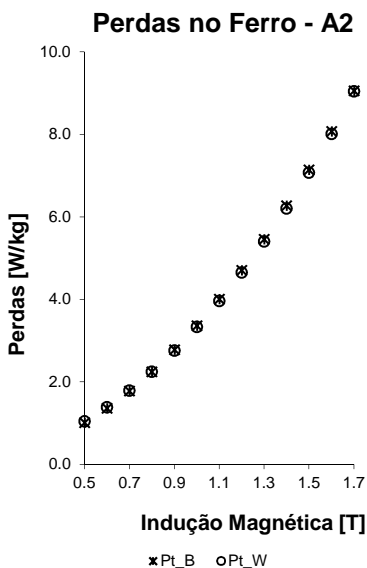


Figura 8-5 - Perdas totais da amostra A2



Entretanto, o comportamento das perdas, quando se faz a separação em histerese e Foucault, não é semelhante, o que pode ser observado na Figura 8-6 e na Figura 8-7. Enquanto que para a amostra A1 as parcelas de perdas mantêm a proporção de 50% (Figura 8-8), na amostra A2 esta proporção não é equilibrada, ficando em torno de 70% e 30% para as parcelas histeréticas e parasíticas respectivamente (Figura 8-9) quando se observam as induções acima de 1,0 T.

Este comportamento diferenciado em amostras classificadas no mesmo grupo se deve ao fato de que não são do mesmo fabricante, ou seja, possuem composição química distinta, resultando em características eletromagnéticas e mecânicas diferentes entre si.



Figura 8-6 – Separação de perdas amostra A1

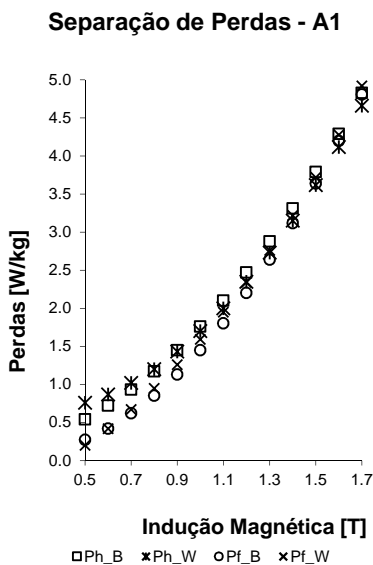


Figura 8-7 - Separação de perdas amostra A2

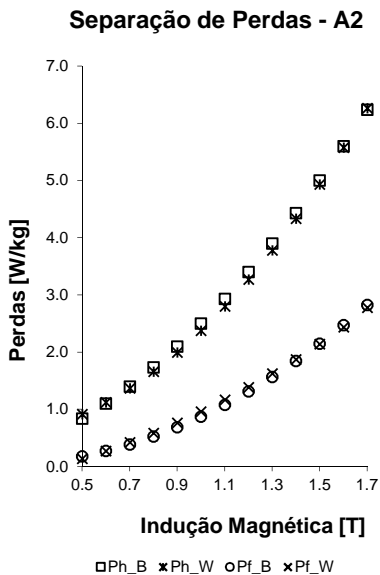


Figura 8-8 – Composição das perdas totais A1

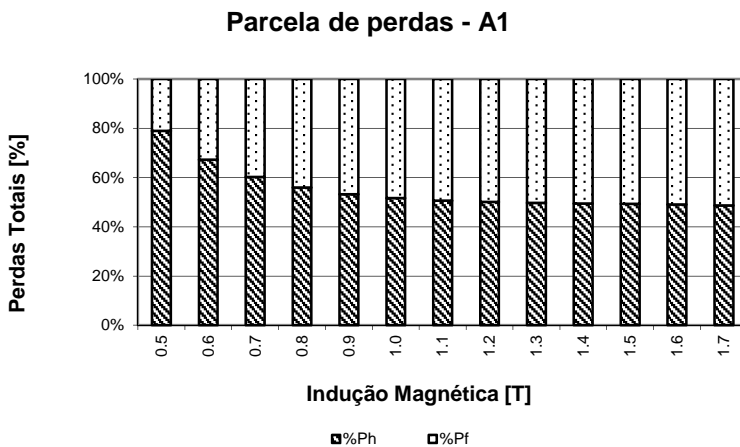
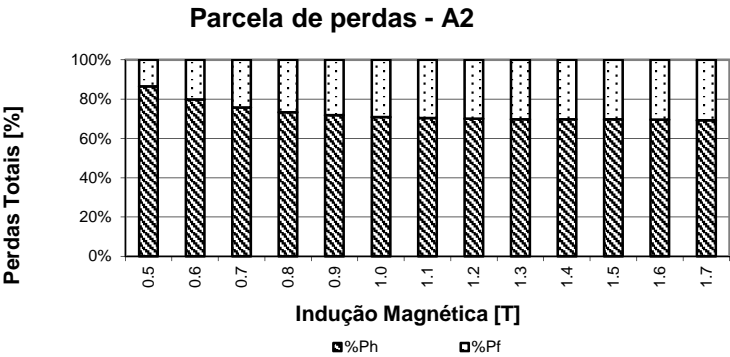


Figura 8-9 - Composição das perdas totais A2



Os valores calculados conforme procedimento normativo, bem como o cálculos das diferenças percentuais em relação aos valores utilizados como referência, são apresentados na Tabela 8-1 para a amostra A1 e na

Tabela 8-2 para a A2.

Tabela 8-1 – Perdas no ferro medidas para a amostra A1

B [T]	SDMF [W/kg]			SDMA [W/kg]			Diferença [%]		
	Ph_B	Pf_B	Pt_B	Ph_W	Pf_W	Pt_W	ΔPh	ΔPf	ΔPt
0,5	0,54	0,27	0,81	0,76	0,20	0,96	-39,47	26,52	-17,30
0,6	0,72	0,42	1,14	0,87	0,42	1,29	-20,44	1,05	-12,44
0,7	0,93	0,62	1,55	1,02	0,67	1,69	-9,28	-8,32	-8,90
0,8	1,17	0,85	2,02	1,20	0,95	2,15	-2,71	-11,18	-6,28
0,9	1,45	1,13	2,58	1,43	1,26	2,69	1,12	-11,21	-4,29
1,0	1,76	1,45	3,21	1,70	1,59	3,29	3,29	-10,00	-2,71
1,1	2,10	1,80	3,90	2,00	1,95	3,95	4,43	-8,27	-1,44
1,2	2,47	2,20	4,67	2,35	2,34	4,69	4,92	-6,41	-0,42
1,3	2,88	2,64	5,52	2,73	2,76	5,49	4,99	-4,66	0,37
1,4	3,31	3,12	6,43	3,15	3,22	6,37	4,80	-3,20	0,92
1,5	3,79	3,64	7,43	3,62	3,72	7,34	4,44	-2,21	1,18
1,6	4,29	4,20	8,49	4,12	4,28	8,40	3,97	-1,86	1,09
1,7	4,83	4,81	9,64	4,66	4,92	9,58	3,44	-2,34	0,55

Tabela 8-2 – Perdas no ferro medidas para a amostra A2

B [T]	SDMF [W/kg]			SDMA [W/kg]			Diferença [%]		
	Ph_B	Pf_B	Pt	Ph_W	Pf_W	Pt_W	$\Delta Ph$	$\Delta Pf$	$\Delta Pt$
0,5	0,83	0,17	1,00	0,91	0,14	1,05	-9,56	18,35	8,79
0,6	1,09	0,26	1,35	1,11	0,28	1,39	-1,76	-6,52	-8,28
0,7	1,39	0,38	1,77	1,36	0,43	1,79	2,19	-14,65	-12,46
0,8	1,72	0,51	2,23	1,65	0,60	2,25	4,07	-15,94	-11,87
0,9	2,09	0,68	2,77	1,99	0,77	2,76	4,77	-14,34	-9,57
1,0	2,49	0,86	3,35	2,37	0,97	3,34	4,79	-12,65	-7,86
1,1	2,92	1,07	3,99	2,79	1,17	3,96	4,40	-9,62	-5,22
1,2	3,39	1,30	4,69	3,26	1,39	4,65	3,77	-6,86	-3,09
1,3	3,89	1,56	5,45	3,77	1,63	5,40	3,00	-4,57	-1,57
1,4	4,42	1,83	6,25	4,33	1,87	6,20	2,16	-2,01	0,15
1,5	4,99	2,14	7,13	4,93	2,13	7,06	1,28	0,15	1,43
1,6	5,59	2,46	8,05	5,57	2,43	8,00	0,40	1,46	1,86
1,7	6,23	2,81	9,04	6,26	2,76	9,02	-0,46	1,65	1,19

A amostra SP testada, designada como A3, apresenta uma maior assertividade dos valores calculados pelo método normalizado, quando comparado com os valores de referência, até a indução de 1,6 T (Figura 8-10).

O comportamento acima descrito pode ser melhor observado no gráfico da separação de perdas, Figura 8-11, no qual as perdas de origem histerética calculadas foram superiores às calculadas com o sistema de referência, acima de 1,4 T. As perdas por correntes parasitas, abaixo de 1,4 T são menores, às obtidas no SDMF. Esta oscilação no comportamento das perdas, melhor apreciado na Figura 8-12, pode ser devido às variações do valor do fator de forma que, embora atenda as solicitações normativas pode variar até 1% de 1,11, conforme apresentado em ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1977).

Figura 8-10 – Perdas totais da amostra A3

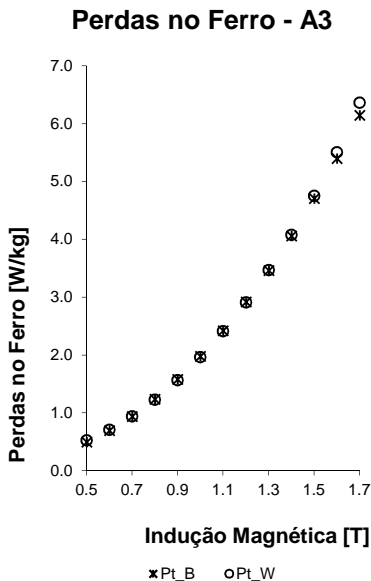


Figura 8-11 - Separação de perdas amostra A3

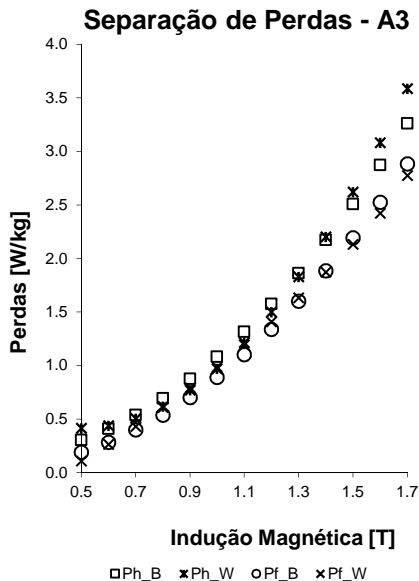
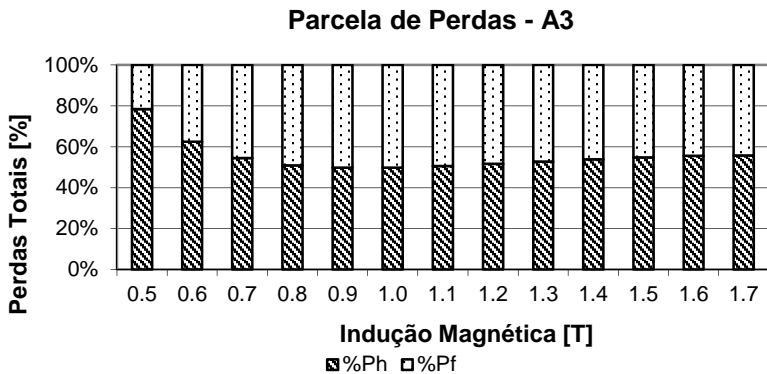


Figura 8-12 – Composição das perdas totais A3



Para induções mais elevadas, a diferença percentual dos valores de perdas totais calculados para o SDMA em relação ao SDMF aumenta progressivamente, conforme apresentado na Tabela 8-3.

Tabela 8-3 – Perdas no ferro medidas para a amostra A3

B [T]	SDMF [W/kg]			SDMA [W/kg]			Diferença [%]		
	Ph_B	Pf_B	Pt	Ph_W	Pf_W	Pt_W	$\Delta Ph$	$\Delta Pf$	$\Delta Pt$
0,5	0,30	0,19	0,49	0,41	0,11	0,52	-34,64	40,35	-5,92
0,6	0,41	0,28	0,69	0,43	0,26	0,69	-6,56	6,95	-1,05
0,7	0,54	0,39	0,93	0,50	0,42	0,92	6,44	-6,27	1,04
0,8	0,69	0,53	1,22	0,61	0,59	1,20	11,34	-10,55	1,79
0,9	0,87	0,70	1,57	0,77	0,78	1,55	12,01	-10,88	1,83
1,0	1,08	0,89	1,97	0,97	0,97	1,94	10,52	-9,47	1,50
1,1	1,31	1,10	2,41	1,21	1,18	2,39	7,97	-7,32	1,00
1,2	1,57	1,34	2,91	1,50	1,40	2,90	4,97	-4,88	0,44
1,3	1,86	1,60	3,46	1,83	1,64	3,47	1,82	-2,42	-0,13
1,4	2,17	1,88	4,05	2,20	1,89	4,09	-1,29	-0,16	-0,77
1,5	2,51	2,19	4,70	2,62	2,16	4,78	-4,30	1,59	-1,55
1,6	2,87	2,52	5,39	3,08	2,46	5,54	-7,16	2,40	-2,68
1,7	3,26	2,88	6,14	3,58	2,84	6,42	-9,84	1,59	-4,47

No que tange aos aços TP as análises foram divididas em função das classes de perdas, ou seja, primeiramente serão vistas as amostras A4 e A5 e posteriormente as amostras A6 e A7.

No primeiro grupo de amostras percebe-se que os valores obtidos possuem a mesma ordem de grandeza e seguem uma tendência de comportamento semelhante, embora para a amostra A4, o SDMA apresente valores calculados de perdas totais mais elevados (Figura 8-13), ele tende a diminuir essa diferença com o crescente aumento dos valores de indução magnética.

Na amostra A5, Figura 8-14, o quadro anterior se inverte, dessa forma os valores de perdas calculados pelo método normativo são mais elevados nas altas induções.

Tal comportamento é atribuído à qualidade dos valores medidos nos sistemas, uma vez que a metodologia normalizada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) necessita de valores medidos em diferentes frequências e induções. O SDMA, justamente por não possuir um controle em malha fechada da forma de onda da

tensão induzida, ou seja, não possui um monitoramento preciso do fator de forma da onda induzida utiliza, conforme sugerido no método do cálculo das perdas, um fator de correção que procura ajustar o valor das perdas por correntes induzidas, considerando assim as deformações que porventura foram introduzidas na forma de onda de tensão induzida.

Figura 8-13 - Perdas totais da amostra A4

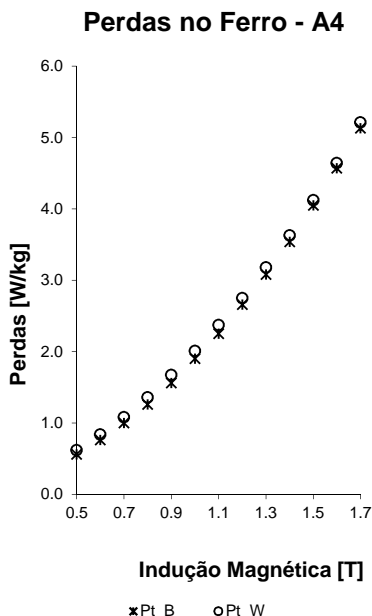
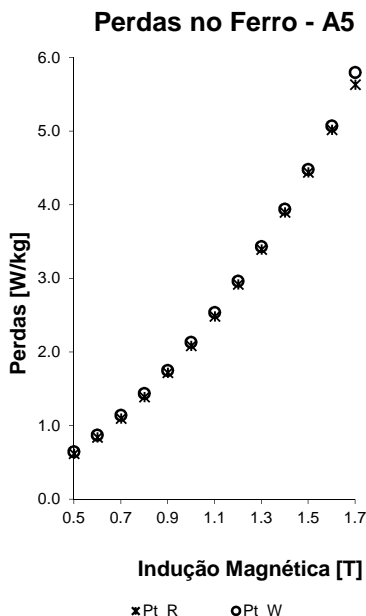


Figura 8-14 - Perdas totais da amostra A5



O comportamento das curvas de histerese para a amostra A4 (Figura 8-15) e A5 (Figura 8-16) são semelhantes para as induções acima de 1,0 T. Para induções abaixo desse valor na amostra A4 as perdas coincidiram com os valores de referência.

O comportamento esperado é o apresentado na amostra A5, em função de que nas baixas induções as diferenças nas parcelas calculadas tanto para as  $P_h$  quanto para  $P_p$  são maiores e podem ser atribuídas à acuidade na medição das perdas totais, uma vez que baseado nelas são desenvolvidos os cálculos de separação das perdas.

No que se refere às perdas por correntes de Foucault, embora o comportamento semelhante das curvas das amostras A4 e A5, deve-se

salientar que são de fornecedores distintos, portanto possuem composição química própria. Isto justifica os valores diferenciados das contribuições percentuais na composição das perdas totais, que são apresentadas na

Figura 8-17 (A4) e na Figura 8-18 (A5).

Figura 8-15 - Separação de perdas amostra A4

Figura 8-16 - Separação de perdas amostra A5

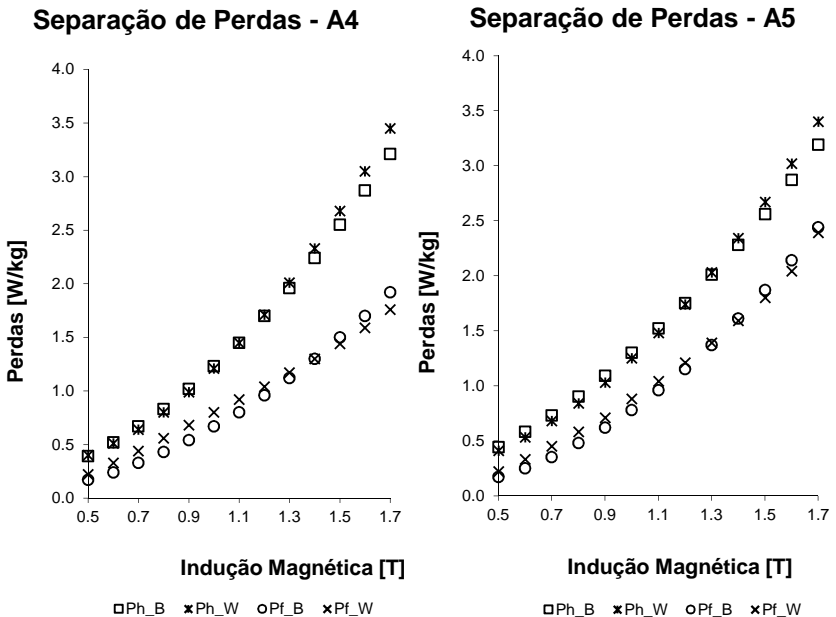


Figura 8-17 – Composição das perdas totais A4

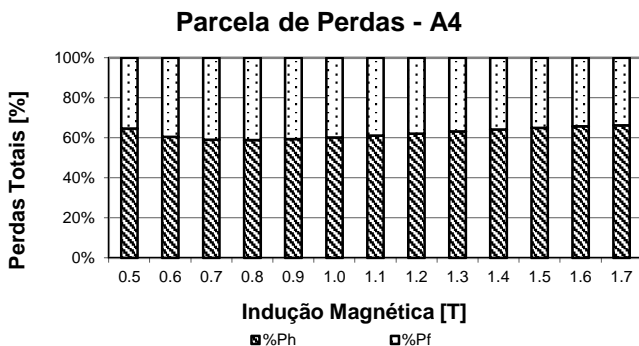
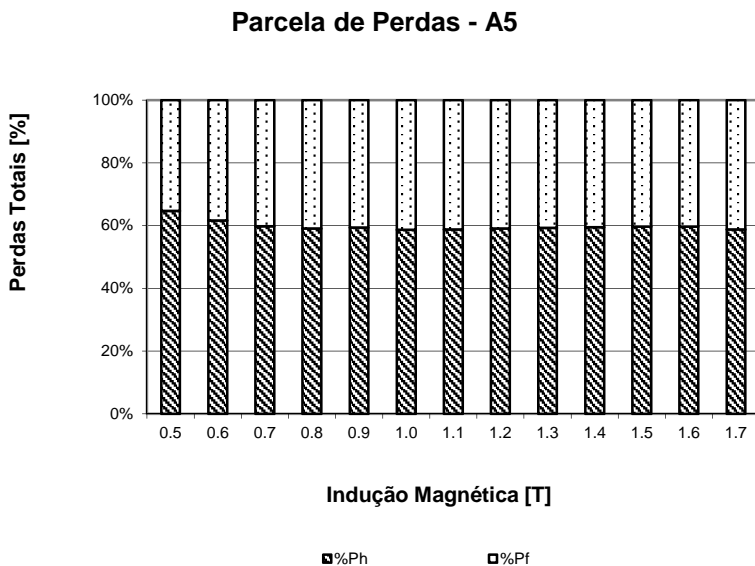


Figura 8-18 – Composição das perdas totais A5



As diferenças no cálculo podem ser devidas às variações nas medições das perdas, ou seja, durante o processo de cálculo dos coeficientes de intersecção e de inclinação os pontos não estavam completamente colineares. Este é um fator intrínseco do método matemático para a determinação destes coeficientes. Conforme comentado no início deste capítulo o objetivo deste trabalho consiste em validar o sistema de medição das perdas totais, os cálculos de separação



de perdas foram inseridos para fornecer uma ferramenta adicional ao sistema, seguindo as recomendações normativas.

Na medida em que as induções aumentam a diferença percentual entre os valores calculados do SDMA e dos valores do SDMF (referência) tendem a diminuir, conforme apresentado na Tabela 8-4 e

Tabela 8-5.

As perdas calculadas para as amostras de material TP classe 50A470 testadas no SDMA são mostradas na Figura 8-19 para a amostra A6 e na Figura 8-20 para a A7. Pode-se perceber a semelhança das curvas entre si bem como a coincidência dos valores obtidos.

Tabela 8-4 – Perdas no ferro medidas para a amostra A4

B [T]	SDMF [W/kg]			SDMA [W/kg]			Diferença [%]		
	Ph_B	Pf_B	Pt	Ph_W	Pf_W	Pt_W	$\Delta Ph$	$\Delta Pf$	$\Delta Pt$
0,5	0,39	0,17	0,56	0,40	0,22	0,62	-3,35	-28,01	-10,90
0,6	0,52	0,24	0,76	0,51	0,33	0,84	1,63	-36,10	-10,46
0,7	0,67	0,33	1,00	0,64	0,44	1,08	3,39	-35,34	-9,43
0,8	0,83	0,43	1,26	0,80	0,56	1,36	3,53	-31,11	-8,24
0,9	1,02	0,54	1,56	0,99	0,68	1,67	2,83	-25,63	-7,03
1,0	1,23	0,67	1,90	1,21	0,80	2,01	1,71	-19,85	-5,88
1,1	1,45	0,80	2,25	1,45	0,92	2,37	0,39	-14,20	-4,81
1,2	1,70	0,96	2,66	1,71	1,04	2,75	-0,99	-8,90	-3,85
1,3	1,96	1,12	3,08	2,01	1,17	3,18	-2,39	-4,06	-3,00
1,4	2,24	1,30	3,54	2,33	1,30	3,63	-3,76	0,33	-2,26
1,5	2,55	1,50	4,05	2,68	1,44	4,12	-5,08	3,84	-1,78
1,6	2,87	1,70	4,57	3,05	1,59	4,64	-6,34	6,77	-1,45
1,7	3,21	1,92	5,13	3,45	1,76	5,21	-7,53	8,39	-1,56

Tabela 8-5 – Perdas no ferro medidas para a amostra A5

B [T]	SDMF [W/kg]			SDMA [W/kg]			Diferença [%]		
	Ph_B	Pf_B	Pt	Ph_W	Pf_W	Pt_W	$\Delta Ph$	$\Delta Pf$	$\Delta Pt$
0,5	0,44	0,17	0,61	0,41	0,22	0,63	5,83	-31,31	-4,63
0,6	0,58	0,25	0,83	0,53	0,33	0,86	7,68	-30,61	-4,04
0,7	0,73	0,35	1,08	0,68	0,45	1,13	7,67	-27,47	-3,84

0,8	0,90	0,48	1,38	0,84	0,58	1,42	6,75	-22,21	-3,27
0,9	1,09	0,62	1,71	1,03	0,71	1,74	5,38	-14,44	-1,79
1,0	1,30	0,78	2,08	1,25	0,88	2,13	3,81	-12,71	-2,39
1,1	1,52	0,96	2,48	1,48	1,04	2,52	2,18	-8,86	-2,09
1,2	1,75	1,15	2,90	1,74	1,21	2,95	0,55	-4,65	-1,52
1,3	2,01	1,37	3,38	2,03	1,39	3,42	-1,04	-1,50	-1,23
1,4	2,28	1,61	3,89	2,34	1,59	3,93	-2,57	1,00	-1,09
1,5	2,56	1,87	4,43	2,67	1,80	4,47	-4,02	3,37	-0,90
1,6	2,87	2,14	5,01	3,02	2,04	5,06	-5,40	4,87	-1,01
1,7	3,19	2,44	5,63	3,40	2,39	5,79	-6,71	2,08	-2,89

Nas baixas induções os valores do SDMA são maiores que os do SDMF, em função do que já foi exposto anteriormente a respeito da acuidade da medição da intensidade da corrente no enrolamento primário do quadro de Epstein. Nos valores obtidos acima da indução de 1,0 T, onde a intensidade de corrente é mais elevada a assertividade em sua determinação é mais acentuada.

Ao observarem-se os valores das duas componentes de perdas que compõem as perdas totais calculadas, tanto para a amostra A6, Figura 8-21, como para a amostra A7, Figura 8-22, verifica-se nitidamente esse comportamento.

As perdas de origem histerética calculadas pelo método para o SDMA foram superiores às obtidas pelo SDMF, nas baixas induções a diferença é de aproximadamente 1% e nas altas induções esta diferença diminui para 0,13%. A Figura 8-21 destaca melhor este comportamento nas baixas induções enquanto a Figura 8-22 realça esta variação nas induções mais altas.

Figura 8-19 - Perdas totais da amostra A6

Figura 8-20 - Perdas totais da amostra A7

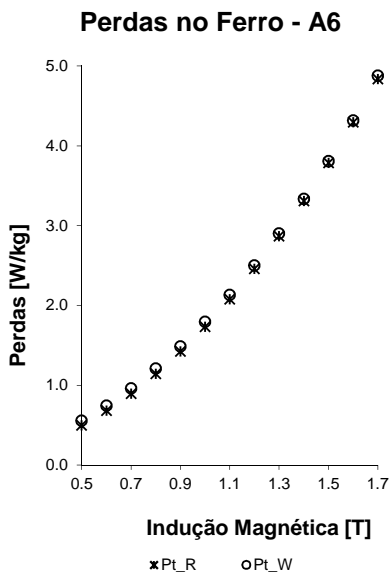


Figura 8-21 - Separação de perdas amostra A6

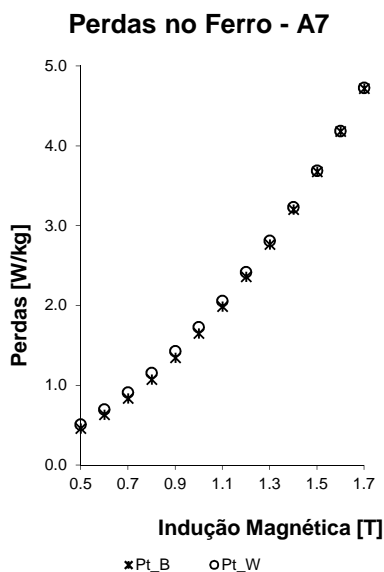
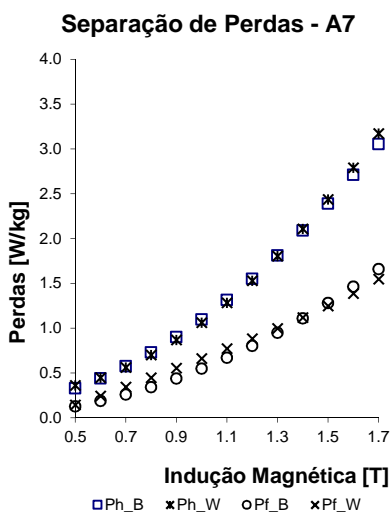
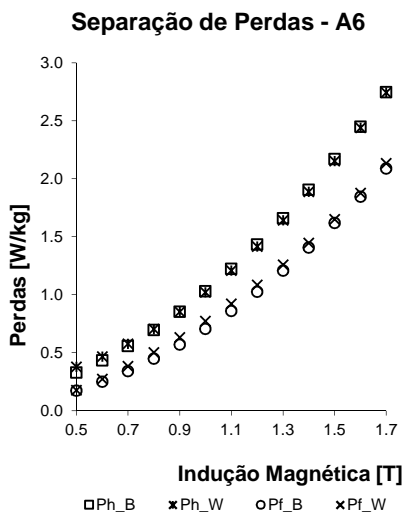


Figura 8-22 - Separação de perdas amostra A7



Na Figura 8-23 observa-se que na composição das perdas da amostra A6 as Ph estão abaixo de 60%, para as induções acima de 1,0 T, ao passo que na amostra A7, Figura 8-24, a contribuição é superior a 60% para a mesma faixa de induções. Esta é uma demonstração de que os materiais possuem composição química diferenciada.

Figura 8-23 – Composição das perdas totais A6

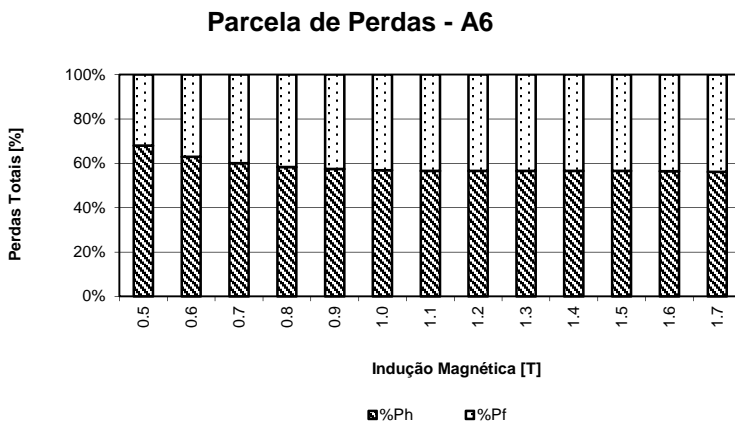
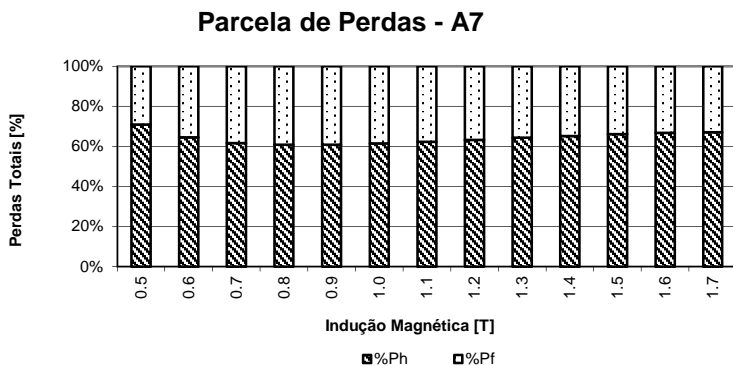


Figura 8-24 – Composição das perdas totais A7



Na faixa de induções de trabalho, entre os valores de 1,0 a 1,7 T as diferenças percentuais calculadas entre os valores dos dois sistemas, para ambas as amostras, são menores que 5 % na indução de 1,0 T e

inferiores a 1 % na indução de 1,5 T, conforme apresentado na Tabela 8-6 e Tabela 8-7.

Tabela 8-6 – Perdas no ferro medidas para a amostra A6

B [T]	SDMF [W/kg]			SDMA [W/kg]			Diferença [%]		
	Ph_B	Pf_B	Pt	Ph_W	Pf_W	Pt_W	$\Delta Ph$	$\Delta Pf$	$\Delta Pt$
0,50	0,33	0,17	0,50	0,37	0,17	0,54	-14,51	-3,50	-10,75
0,60	0,43	0,24	0,67	0,46	0,27	0,73	-7,51	-10,83	-8,72
0,70	0,55	0,34	0,89	0,57	0,38	0,95	-3,48	-12,82	-7,02
0,80	0,69	0,44	1,13	0,70	0,50	1,20	-1,17	-12,54	-5,61
0,90	0,85	0,56	1,41	0,85	0,63	1,48	0,13	-11,24	-4,41
1,00	1,03	0,70	1,73	1,02	0,77	1,79	0,82	-9,51	-3,38
1,10	1,22	0,85	2,07	1,21	0,92	2,13	1,12	-7,66	-2,50
1,20	1,43	1,02	2,45	1,41	1,08	2,49	1,19	-5,85	-1,75
1,30	1,66	1,20	2,86	1,64	1,26	2,90	1,10	-4,24	-1,15
1,40	1,90	1,40	3,30	1,89	1,44	3,33	0,92	-2,93	-0,71
1,50	2,17	1,61	3,78	2,15	1,65	3,80	0,69	-2,06	-0,49
1,60	2,45	1,84	4,29	2,44	1,87	4,31	0,42	-1,76	-0,52
1,70	2,74	2,09	4,83	2,74	2,13	4,87	0,13	-2,18	-0,87

No que diz respeito às perdas por correntes parasitas, de menor intensidade, os valores obtidos pelo SDMA foram maiores que os do SDMF ao longo de toda a faixa de induções medidas. Esse resultado pode ser atribuído às correções nesta parcela das perdas devido às variações do fator de forma do sistema, quando da medição direta das perdas totais das amostras.

Tabela 8-7 – Perdas no ferro medidas para a amostra A7

B [T]	SDMF [W/kg]			SDMA [W/kg]			Diferença [%]		
	Ph_B	Pf_B	Pt	Ph_W	Pf_W	Pt_W	$\Delta Ph$	$\Delta Pf$	$\Delta Pt$
0,50	0,33	0,12	0,45	0,36	0,14	0,50	-9,02	-15,21	-10,75
0,60	0,44	0,18	0,62	0,44	0,24	0,68	-1,08	-31,53	-10,13
0,70	0,57	0,25	0,82	0,56	0,34	0,90	2,52	-34,21	-8,87
0,80	0,73	0,34	1,07	0,70	0,45	1,15	3,83	-31,45	-7,45
0,90	0,90	0,44	1,34	0,87	0,55	1,42	3,92	-26,56	-6,05

1,00	1,10	0,54	1,64	1,06	0,66	1,72	3,37	-20,99	-4,74
1,10	1,31	0,67	1,98	1,28	0,77	2,05	2,49	-15,40	-3,54
1,20	1,55	0,80	2,35	1,53	0,88	2,41	1,45	-10,10	-2,49
1,30	1,81	0,95	2,76	1,80	1,00	2,80	0,36	-5,27	-1,58
1,40	2,09	1,11	3,20	2,11	1,12	3,23	-0,74	-1,03	-0,84
1,50	2,39	1,28	3,67	2,43	1,25	3,68	-1,82	2,49	-0,31
1,60	2,71	1,46	4,17	2,79	1,39	4,18	-2,85	5,12	-0,06
1,70	3,05	1,66	4,71	3,17	1,55	4,72	-3,83	6,62	-0,15

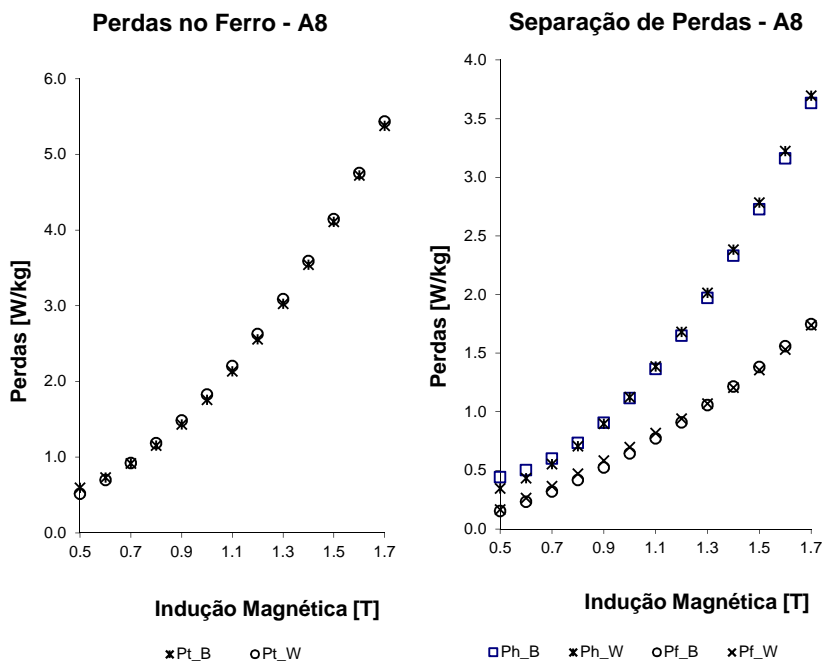
A amostra 8 (A8), era utilizada como amostra de referência para verificar se ocorria variação no processo de medição, sendo assim, periodicamente esta amostra era ensaiada para avaliação da repetibilidade dos valores obtidos nos ensaios. O material de referência foi adquirido pela empresa com valores certificados de perdas e permeabilidade em induções pré-definidas. Desta forma, os dados ensaiados eram comparados com os dados certificados possibilitando a avaliação do processo de medição.

A curva de perdas e a separação de perdas são apresentadas na Figura 8-25 e Figura 8-26 respectivamente. No que diz respeito à medição direta das perdas existe concordância nos valores obtidos com o SDMA e o SDMF, ficando a média da variação entre o sistema proposto e o de referência em torno de 1,85 % na região de interesse.

Na figura da separação de perdas, o SDMA apresenta valores mais elevados de perdas por correntes parasitas nas baixas induções e valores superiores de perdas histeréticas nas altas induções. Este comportamento, conforme pode ser observado nas outras amostras analisadas, pode ser justificada pela precisão na determinação da corrente de magnetização que circula pelo enrolamento primário do quadro de Epstein.

Figura 8-25 – Perdas totais na amostra A8

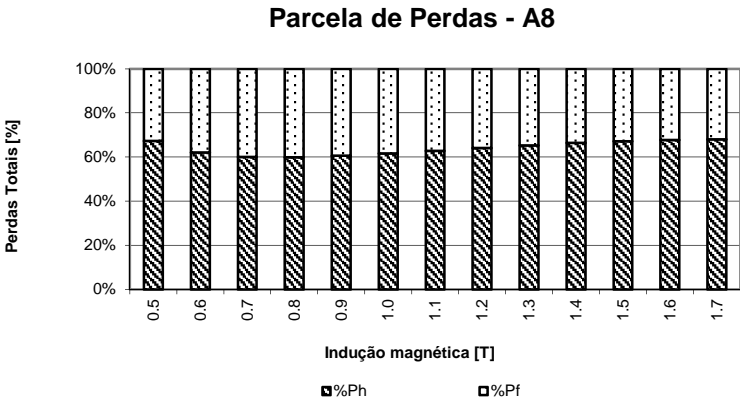
Figura 8-26 – Separação de perdas amostra A8



A composição das perdas totais, segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1977), apresentada pela Figura 8-27, mostra que a parcela das perdas por correntes parasitas é menor em todas as faixas de indução magnética, isto significa que, quando comparada com as outras amostras ensaiadas, em se tratando de perdas a qualidade da amostra A8 é elevada.

Os valores encontrados no cálculo da soma da parcela das perdas por histerese e a parcela das perdas por correntes parasitas apontam que o sistema pode ser utilizado, uma vez que atende a tolerância desejada, na região de interesse da indução magnética.

Figura 8-27 – Composição das perdas totais



Pode ser observado na Tabela 8-8 a variação percentual dos valores calculados para a amostra A8.

Tabela 8-8 – Perdas no ferro medidas para a amostra A8

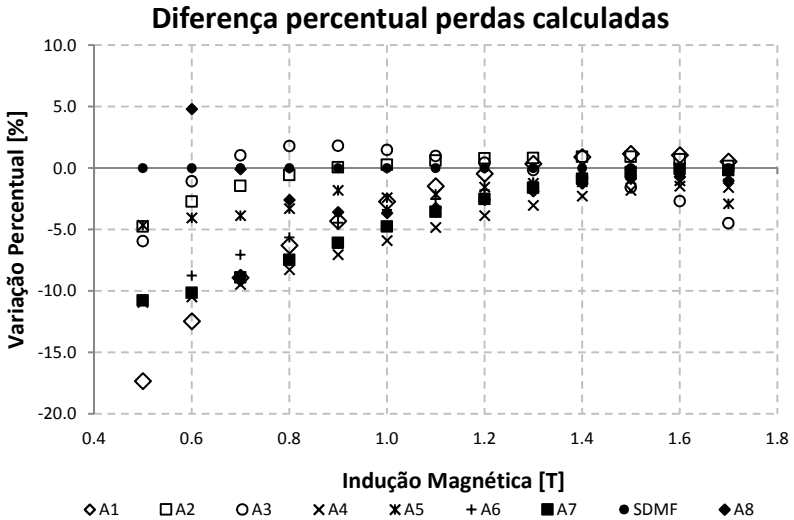
B [T]	SDMF [W/kg]			SDMA [W/kg]			Diferença [%]		
	Ph_B	Pf_B	Pt	Ph_W	Pf_W	Pt_W	ΔPh	ΔPf	ΔPt
0,50	0,44	0,15	0,59	0,34	0,16	0,50	21,10	-9,65	13,15
0,60	0,50	0,23	0,73	0,43	0,26	0,69	13,71	-14,37	4,83
0,70	0,60	0,32	0,92	0,55	0,36	0,91	7,76	-14,73	-0,07
0,80	0,73	0,41	1,14	0,71	0,47	1,18	3,57	-13,36	-2,57
0,90	0,90	0,52	1,42	0,90	0,58	1,48	0,88	-11,20	-3,55
1,00	1,11	0,64	1,75	1,12	0,70	1,82	-0,73	-8,69	-3,64
1,10	1,36	0,77	2,13	1,38	0,81	2,19	-1,63	-6,06	-3,23
1,20	1,65	0,91	2,56	1,68	0,94	2,62	-2,08	-3,50	-2,58
1,30	1,97	1,05	3,02	2,01	1,07	3,08	-2,24	-1,21	-1,88
1,40	2,33	1,21	3,54	2,38	1,20	3,58	-2,23	0,62	-1,25
1,50	2,72	1,38	4,10	2,78	1,35	4,13	-2,12	1,73	-0,82
1,60	3,16	1,56	4,72	3,22	1,53	4,75	-1,94	1,82	-0,70
1,70	3,63	1,74	5,37	3,69	1,73	5,42	-1,74	0,51	-1,01

Embora não tenham sido adotados limites de tolerância para o cálculo das perdas pelos procedimentos normativos, são apresentadas as variações das diferenças percentuais calculadas para todas as amostras na Figura 8-28.



É possível observar que na faixa de interesse do sistema de ensaios, ou seja, entre as induções de 1,0 a 1,7 T, os valores obtidos também atendem a tolerância de  $\pm 5\%$ .

Figura 8-28 – Valores de perdas calculadas totais em relação à referência.



De certa forma, esses resultados apresentam uma segurança adicional, uma vez que, a variação pontual de 5% entre os resultados calculados obtidos por sistemas conceitualmente semelhantes, mas com controle e estruturas diferentes, indicam a mesma tendência de comportamento na aquisição, cálculo e manipulação dos dados das perdas totais.

#### 8.4 PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Embora o sistema possa traçar curvas de permeabilidade magnética, foi utilizado neste estudo, para a validação do SDMA, o valor que ela atinge na indução de 1,5 T. A escolha desse ponto se deve principalmente a critérios específicos de qualidade da empresa e ao fato de que as aciarias apresentam este valor em seus catálogos, sendo portanto possível realizar uma comparação direta dos dados medidos com os apresentados pelos fornecedores.

Na Tabela 8-9 são apresentadas as permeabilidades encontradas nos dois sistemas. A permeabilidade magnética é calculada segundo a

Equação (5.7), portanto, necessita tanto dos valores de tensão induzida no enrolamento secundário do quadro de Epstein, quanto dos valores de corrente que circulam no enrolamento primário, para que se possa obter a  $B_m$  e  $H_m$  respectivamente.

Tabela 8-9 – Permeabilidade magnética medida

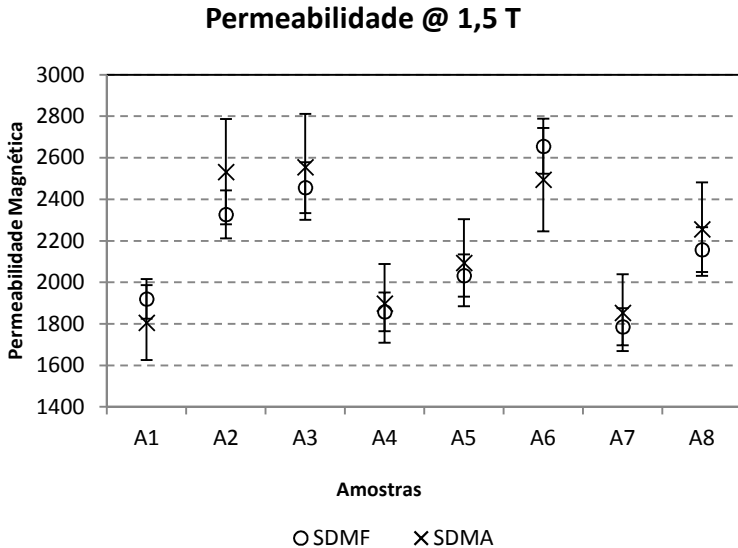
Amostra	SDMF	SDMA
A1	1920	1807
A2	2327	2533
A3	2456	2556
A4	1858	1898
A5	2033	2094
A6	2655	2495
A7	1787	1854
A8	2158	2256

A permeabilidade no ponto de 1,5 T, calculada pelo SDMA atende a tolerância previamente estabelecida (Quadro 7-2), tendo como referência o que foi medido no SDMF para as diferentes classes de materiais. A Figura 8-29 apresenta os resultados encontrados em ambos os sistemas bem como a faixa de tolerância admitida.

É possível observar que as amostras A1 e A2, embora sejam utilizadas para a mesma aplicação em função do nível de perdas, possuem permeabilidade diferente. O processamento destes materiais também são diversos, enquanto a amostra A1 necessita ser submetida ao processamento térmico, para alcançar as propriedades magnéticas desejadas após o processo de estampagem, a amostra A2, em alguns casos, não necessita passar pelo forno. As amostras A4 e A5 apesar de pertencerem a fornecedores diferentes possuem permeabilidade muito próxima, o que viabiliza uma melhor maleabilidade na escolha do material disponível em estoque. O mesmo já não se pode afirmar com relação às amostras A6 e A7 que, embora sejam materiais de mesma classe, possuem características de permeabilidade distintas. Essa característica não desejada pode ser contornada na etapa de processamento do material ou pela adequação do projeto do produto. Normalmente é mais viável economicamente o reprojeito do produto,

uma vez que alterar a logística fabril com desvios de fabricação para adequação de processos envolve uma série de medidas e esforço conjunto adicional de diversas áreas da empresa.

Figura 8-29 – Permeabilidade magnética obtida nos dois sistemas

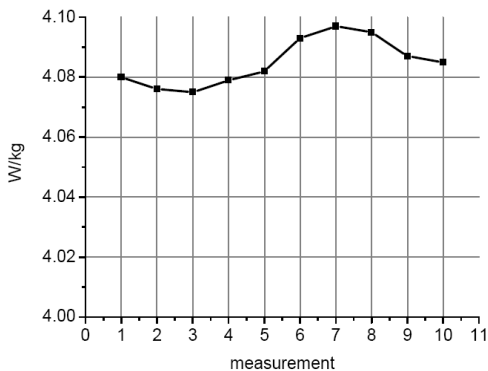


### 8.5 A REPETIBILIDADE NO SDMA

A avaliação da repetibilidade no SDMA foi realizada na observação do comportamento das características do material de referência ao longo do tempo. Foram comparados 10 ensaios realizados em períodos diversos. Segundo Fukuhara, Yonamine e Missell, (2006) existem variações nos valores medidos ao longo do tempo (Figura 8-30), devido a fatores como envelhecimento magnético, acréscimo de tensões mecânicas no material devido ao manuseio. Em função disso, recomenda-se que o material de referência deva ser periodicamente reavaliado por entidade credenciada. Essa periodicidade é estipulada em função das características do próprio material e dos critérios de qualidade adotados pela empresa. A Figura 8-31 apresenta um levantamento da repetibilidade do SDMA com o material A8. Embora a Figura 8-30 e a Figura 8-31 sejam de amostras diferentes, os dois

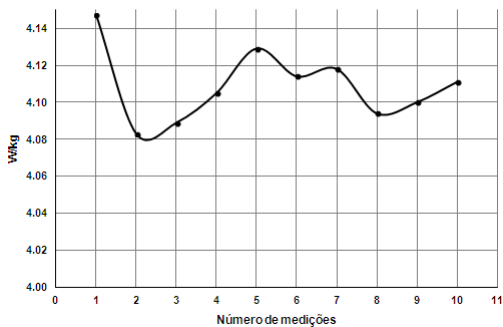
gráficos apontam variações nas medidas realizadas ao longo do tempo, sendo assim, pode-se entender que possuem comportamento semelhante.

Figura 8-30 – Verificação da repetibilidade da amostra do Inmetro em 1,5T/60Hz



Fonte: Fukuhara, Yonamine e Missell, (2006)

Figura 8-31 - Verificação da repetibilidade do material de referência no SDMA em 1,5T/60Hz



## 9 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta as etapas de desenvolvimento e implementação de uma bancada automatizada para a caracterização de materiais magnéticos, utilizando como dispositivo de medição o quadro de Epstein. Em função de critérios pré-estabelecidos, foi especificado para controle da bancada um Sistema Digital em Malha Aberta (SDMA). Para efeito de validação e comparação dos resultados, utilizou-se um equipamento comercial, referenciado neste texto como Sistema Digital em Malha Fechada (SDMF). Foram comparados os resultados das perdas totais de origem magnética para induções magnéticas dentro de uma região de interesse, estabelecida entre 1,0 e 1,7 T. A permeabilidade magnética no ponto de 1,5 T também foi avaliada. Para a validação dos resultados foram comparados os valores obtidos em um sistema de referência com o sistema proposto e verificado se atendiam às tolerâncias previamente estabelecidas.

Em se tratando de um ensaio cujas aplicações principais são a avaliação da qualidade do material, pelo departamento de controle de qualidade, e o desenvolvimento de novos fornecedores, pelo departamento de suprimentos, os objetivos estipulados para a automação do processo de medição foram alcançados. Entre esses se destacam o aumento de produtividade e qualidade dos ensaios. Outras melhorias foram implantadas como, por exemplo, a leitura simultânea dos sinais de corrente e tensões, a montagem de um arquivo com os resultados dos valores medidos que pode ser lido pelo *software* de banco de dados ou ser visualizado separadamente. Como consequência dessas melhorias houve a diminuição do tempo de ensaio e da interferência do operador tanto no andamento do ensaio quanto na leitura dos valores utilizados nos cálculos pelo sistema.

Uma vez que o SDMA estava em funcionamento, foram realizados ensaios para o ajuste do sistema, tanto a nível de melhorias no algoritmo do *software* de controle, como nos ajustes dos ganhos dos sensores de corrente e tensões na forma de comparação dos resultados obtidos com os resultados previamente ensaiados no sistema de referência.

Embora o SAMA e o SDMA apresentem funcionalidade semelhante, isto é, são utilizados para a caracterização de materiais magnéticos, são estruturalmente diferentes, conforme abordado no decurso desta dissertação. Tanto os valores de perdas medidos quanto os de permeabilidade calculados atendem às tolerâncias previamente

estipuladas, conforme observado nas comparações que foram realizadas individualmente e por classes de aços magnéticos.

Em função da estrutura do SDMA, que foi concebido para substituir o SAMA com os ganhos de produtividade e rendimento, o sistema apresenta melhor desempenho quando caracteriza aços GNO que apresentam intensidade de corrente de magnetização elevada e consequentemente campos magnéticos mais significativos. Essa característica pode ser comprovada nos resultados encontrados, uma vez que, para os materiais com baixo teor de silício, o sistema possui melhor precisão e repetibilidade.

A época do desenvolvimento deste trabalho a demanda por ensaios de aços GO era praticamente inexistente, quando comparada com a de aços GNO. Embora, durante o desenvolvimento deste trabalho não tivéssemos amostras de referência para aços GO, motivo pelo qual não acrescentamos às amostras ensaiadas este tipo de material, eles podem ser ensaiados no SDMA, sendo que a avaliação de seus resultados dispensa uma criteriosa análise.

Sendo assim, conclui-se que é viável a substituição do Sistema Analógico de Malha Aberta pelo Sistema Digital de Malha Aberta, agregando ao processo todas as vantagens que este apresenta em relação aquele.

Embora o sistema atenda a normalização vigente e os requisitos estipulados de projeto, existem ações que podem ser implementadas em uma futura revisão do projeto. Como por exemplo:

- O aumento da sensibilidade do sistema para a detecção de sinais de corrente inferiores a 1 A, a fim de proporcionar melhor acuidade quando da determinação de campos magnéticos oriundos de ensaios com aços GO;
- O incremento do sistema de controle como um todo, transformando-o em um sistema de controle em malha fechada, possibilitando a verificação e o ajuste do sinal de tensão induzida na amostra, antes de se realizar a medição das perdas e permeabilidade;
- A possibilidade de se fazer um acompanhamento *on line* da forma da curva BH além da curva de magnetização; e
- A utilização das características do programa para a realização do cálculo dos coeficientes de Steinmetz, incrementando as ferramentas de análise de desempenho dos aços elétricos.

Além dos ganhos quantitativos abordados, foram obtidos ganhos qualitativos que, embora de difícil mensuração, têm a sua importância como por exemplo, questões relativas à satisfação do cliente interno pela agilidade no tempo de resposta às solicitações (realização do ensaio, análise e liberação dos resultados), a otimização do tempo do laboratorista, a anuência deste em relação à nova dinâmica do processo, a menor interferência humana nos resultados dos ensaios e a maior agilidade na organização da sequência e ordenação dos ensaios quando dos picos de demanda de serviços.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMAR, M.; PROTAT, F. A simple Method for the Estimation of Power Losses in Silicon Iron Sheets under Alternating Pulse Voltage Excitation. **IEEE Transactions on Magnetics**, VOL. 30; NO. 2, March 1994. p. 942-944.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A343 Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Anmmeter -Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame**. [S.l.]. 1997.

ANTONELLI, E.; CARDELLI, E.; FABBA, A. Epstein Frame: How and When it can be really representative about the magnetic behavior of laminated magnetic steels. **IEEE Transactions on Magnetics**, 41, n. 5, May 2005. 1516-1519.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5161 - Produtos laminados de aço para fins elétricos - Verificação das propriedades**. Rio de Janeiro. 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 09026 - Produtos planos de aço para fins elétricos de grão não orientado, semi-processados**. Rio de Janeiro. 1985.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**. 3. ed. Florianópolis, SC: UFSC, 1996.

BASTOS, J. P. A. et al. **Eddy current losses on Epstein frame overlapped corner sheets**. Graz, Austria, p. 342-347. 2006.

BATISTA, A. J.; FAGUNDES, J. C. S.; VIAROUGE, P. An Automated System for Core Loss Measurement and Characterization: A Useful Tool for High Frequency Magnetic Components Design. **IEEE**, p. 540-545, 1998.

BATISTELA, N. J. **Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício**. Tese (Doutorado) - Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 210. 2001.

BATISTELA, N. J. et al. Caracterização Magnética de Lâminas de Aço Silício e Avaliação das Perdas no Ferro sob vários Regimes de Indução. **Revista Controle & Automação**, v. 13, p. 156-164, Agosto 2002.

BERTOTTI, G. General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. XXIV, p. 621-630, 1988.

BERTOTTI, G. et al. An Improved Estimation of Iron Losses in Rotating Electrical Machines. **IEEE Transactions on Magnetics**, VOL. 27, n. 6, November 1991. p. 5007-5009.

BORK, B. C.; CARVALHO, R. B. D.; STRINGARI, J. M. **Manual do Programa de Epstein, Versão 3.0**. Jaraguá do Sul, SC. 2011.

BROCKHAUS Messtechnik Measuring Technology for Soft Magnetic Materials. Disponível em: <[www.brockhaus.net](http://www.brockhaus.net)>. Acesso em: 21 Agosto 2012.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2002.

CAMPOS, M. F.; FALLEIROS, L. S. G.; LANDGRAF, F. J. G. **Análise Crítica do Modelo das Perdas em Excesso**. 58º Congresso Anual da ABM. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2003.

CARDOSO, R. F. D. A. **Influência do tamanho de grão e das adições de Al e Mn nas propriedades magnéticas dos aços elétricos de grão não orientado com 3%Si**. Dissertação (Mestrado), Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, p. 160. 2005.

CARVALHO, R. B. et al. Comparação do valor máximo do campo magnético obtido pelo método da indutância mútua e pela medida da corrente de pico do enrolamento primário do quadro de Epstein. **VII Induscon**, Recife, v. 1, p. 1 - 6, 2006.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; KUSCO, A. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

FUKUHARA, M.; LANDGRAF, F. J. G.; YONAMINE, T. **Material de Referência para Ensaio de Propriedades Magnéticas no Quadro de Epstein**. 59º Congresso Anual - Internacional da ABM. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2004. p. 1799-1807.

FUKUHARA, M.; YONAMINE, T.; MISSEL, F. P. Reference Material for Magnetic Measurements in Epstein Frame. **XVIII IMEKO WORLD CONGRESS Metrology for a Sustainable Development**, Rio de Janeiro; Brazil, September 2006.

GHIZONI, G. B. **PD-88.001 – Manual de Funcionamento do Quadro de Epstein – “Ensaio de Chapas”**. Jaraguá do Sul, SC: WEG, 1991.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60404-2 Magnetic Materials - Part 2: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet and Strip by Means of an Epstein Frame**. [S.l.]. 1996.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS C 2550 Test Methods for Magnetic Steel Sheet and Strip**. [S.l.]. 2000.

JUNIOR, I. A. P. **Sistema Automatizado para Medição e Análise das Propriedades Magnéticas de Materiais Utilizando Quadro de Epstein**. Dissertação (mestrado); Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas. Joinville; SC, p. 137. 2010.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 11. ed. São Paulo: Globo, 1995.

KOSTENKO, M. P.; PIOTROVSKI, L. M. **Máquinas Elétricas**. 2ª Edição. ed. Moscú: Editorial MIR, 1976.

KRAUSE, P. C. **Analysis of electric machinery**. New York: Mc Graw Hill, 1996.

LANDGRAF, F. J. D.; TEIXEIRA, J.; RODRIGUES, D. **Aços Carbono e Aços Silício para fins elétricos**. São Paulo, SP: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2002.

LANDGRAF, F. J. G. et al. **Modelamento da anisotropia de propriedades magnéticas de aços siliciosos totalmente processados.**

Anais do 56 Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM) [CDROM]. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2001. p. 1612-1620.

LANDGRAF, F. J. G.; SCOZ, L. C. **A Separação de Perdas Elétricas como Critério de Avaliação de Processamento de Aços Elétricos.** IV

Seminário sobre Materiais Elétricos e Magnéticos - ABM. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 1994. p. 99–109.

LIMA, J. P. F. **Sistema de Caracterização de Materiais Magnéticos Moles: Aplicação à Caracterização de Aço ao Silício.** Goiás. 2006.

LIMA, J. P. F.; BATISTA, A. J.; MACHADO, P. C. M. Automated Measurement System for Silicon Steel Magnetic Characterization. **IEEE**, p. 336-341, 1998.

MAGELLA, M. A.; TORRE, R. V. B. D.; KÜHN, I. Estudo do comportamento ao cisalhamento na estampagem de aços para fins elétricos - Parte 2: Caracterização Microestrutural. **CONAMET/SAM - SIMPOSIO MATERIA**, 2002.

MENDES, F. B. R. **Análise de Medida de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício.** Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 114. 2004.

MEURER, E. J. et al. Análise e Comparação de Aparelhos para Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício. **MOMAG 2004**, São Paulo, Agosto 2004. 1-5.

MORAES, C.; DALCIDIO, M.; JUSSARA, M. **Cálculo Numérico Computacional.** São Paulo: Atlas, 1989.

MTHOMBENI, T. L.; PILLAY, P.; STRNAT, R. M. W. New Epstein Frame for Lamination Core Loss Measurements Under High Frequencies and High Flux Densities. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 22, n. 3, p. 597-600, September 2007.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW – User Manual**. Austin: January Edition, 1998.

NAU, S. L.; SIGUIMOTO, C. M.; CARVALHO, R. B. D. **Influência dos materiais condutores e magnéticos no desempenho de motores elétricos e sua correlação com a qualidade de energia elétrica**. ENERSHOW Feira e Congresso. São Paulo: Anais Enershow 2003. 2003. p. 13.

OCARIZ, J. R. **Tratado Practico de Electrotecnica**. 6. ed. Bilbao, Espanha: VAGMA, 1968.

PACHECO, J. E. **Programa para Cálculo de Motores Elétricos de Indução**. WEG Indústrias Ltda - Divisão Motores. Jaraguá do Sul. 2001. Visual Basic 5.0.

SENS, M. A.; UETI, E. **Determinação das Características histeréticas e parasíticas em lâminas de materiais magnéticos para corrente alternada**. Seminário Associação Brasileira de Metais – Materiais Magnéticos. São Paulo: Associação Brasileira de Metais – Materiais Magnéticos. 1987. p. 325-380.

SOUZA, H. **Caracterização de Lâminas Retangulares**. Seminário Associação Brasileira de Metais – Materiais Magnéticos. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Metais – Materiais Magnéticos. 1987. p. 381–390.

STRANGES, N.; AND FINDLAY, R. D. **Importance of Rotational Iron Loss Data for Accurate Prediction of Rotating Machine Core Losses**. McMaster University. Ontario, Canada, p. 123-127. 1994.

SUPPLIER PROJETOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA LTDA. **Manual fonte de alimentação monofásica modelo FCAM10-10**. Joinville, SC. 2004.

TORRES, A. G. **Estudo e Caracterização das Perdas Magnéticas em um Motor Trifásico de Indução**. Dissertação (mestrado); Universidade de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 90. 2002.

YOKOGAWA ELECTRIC WORKS LTD. **Instruction Manual for Epstein Iron Loss Test Set**. [S.l.]. [19--].

ZRUDSKY, D. R.; PICHLER, J. M. Virtual Instruments for Instantaneous Power Measurements. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, n. 4, August, 1992. p. 528-534.

## GLOSSÁRIO

Segundo Callister Jr., (2002).

### **Ductilidade**

Uma medida da habilidade de um material em ser submetido a uma deformação plástica apreciável antes de sofrer uma fratura; ela pode ser expressa na forma de uma porcentagem de alongamento (%AL) ou de uma redução percentual nas áreas (%RA) durante um ensaio de tração.

### **Dureza**

Medida da resistência de um material à deformação pela indentação da sua superfície ou por abrasão.

### **Encruamento**

O aumento na dureza e na resistência de um metal dúctil à medida que ele é submetido a uma deformação plástica abaixo da sua temperatura de recristalização.

### **Recristalização**

A formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação no interno de um material previamente deformado a frio, normalmente, é necessário um tratamento térmico de recozimento.

### **Recozimento**

Um termo genérico usado para indicar um tratamento térmico em que a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades de um material são alteradas. “Recozimento” se refere com frequência a um tratamento térmico em que um metal previamente submetido a uma deformação plástica a frio é amolecido pela sua recristalização.

### **Resiliência**

A capacidade de um material em absorver energia quando ele é deformado elasticamente.

### **Tenacidade**

Uma medida da quantidade de energia que é absorvida por um material à medida que este fratura. A tenacidade é indicada pela área total sob a curva tensão deformação em tração para o material.





## APÊNDICE A – Procedimento analítico para o cálculo da separação de perdas segundo a NBR 5161.

O procedimento apresentado para o cálculo dos coeficientes  $C_p$  e  $C_h$ , conforme a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1977), parte da equação (5.3) e resolve um sistema de duas equações e duas incógnitas. É necessário realizar o ensaio em duas frequências distintas. Monta-se o sistema com as equações para cada uma das perdas medidas conforme (A. 1) e (A. 2). O procedimento normativo apresenta a solução do sistema, aqui deduzido.

$$P_{c1} = C_p f_1^2 + C_h f_1 \quad (\text{A. 1})$$

$$P_{c2} = C_p f_2^2 + C_h f_2 \quad (\text{A. 2})$$

De (A. 1) tem-se:

$$C_p = (P_{c1} - C_h f_1) \frac{1}{f_1^2} \quad (\text{A. 3})$$

De (A. 2) tem-se:

$$C_h = (P_{c2} - C_p f_2^2) \frac{1}{f_2} \quad (\text{A. 4})$$

Substituindo (A. 3) em (A. 4) e reescrevendo para  $C_h$  temos:

$$C_h = \left( P_{c2} - \left( (P_{c1} - C_h f_1) \frac{1}{f_1^2} \right) f_2^2 \right) \frac{1}{f_2} \quad (\text{A. 5})$$

Em ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1977),  $a$  é definindo como:

$$a = \frac{f_2}{f_1} \quad (\text{A. 6})$$

Logo:

$$C_h = \left( P_{c2} - \left( (P_{c1} - C_h f_1) a^2 \right) \right) \frac{1}{f_2} \quad (\text{A. 7})$$

$$C_h = \frac{P_{c2}}{f_2} - \left( \frac{(P_{c1} - C_h f_1) a^2}{f_2} \right) \quad (\text{A. 8})$$

$$C_h = \frac{P_{c2}}{f_2} - (P_{c1} - C_h f_1) \frac{a^2}{f_2} \quad (\text{A. 9})$$

$$C_h = \frac{P_{c2}}{f_2} - P_{c1} \frac{a^2}{f_2} + C_h f_1 \frac{a^2}{f_2} \quad (\text{A. 10})$$

$$C_h - C_h f_1 \frac{a^2}{f_2} = \frac{P_{c2}}{f_2} - P_{c1} \frac{a^2}{f_2} \quad (\text{A. 11})$$

$$C_h (1 - a) = \left( P_{c2} - P_{c1} a^2 \right) \frac{1}{f_2} \quad (\text{A. 12})$$

$$C_h = \frac{(P_{c2} - P_{c1} a^2)}{f_2 (1 - a)} \quad (\text{A. 13})$$

O cálculo de  $C_p$  pode ser obtido pela substituição de (A. 13) em (A. 2).

$$P_{c2} = C_p f_2^2 + \left( \frac{P_{c2} - P_{c1} a^2}{f_2 (1-a)} \right) f_2 \quad (\text{A. 14})$$

$$P_{c2} = C_p f_2^2 + \left( \frac{P_{c2} - P_{c1} a^2}{(1-a)} \right) \quad (\text{A. 15})$$

$$P_{c2} = C_p f_2^2 + \frac{P_{c2}}{(1-a)} - \frac{P_{c1} a^2}{(1-a)} \quad (\text{A. 16})$$

Isolando  $C_p$  em (A. 16) tem-se:

$$C_p f_2^2 = P_{c2} - \frac{P_{c2}}{(1-a)} + \frac{P_{c1} a^2}{(1-a)} \quad (\text{A. 17})$$

$$C_p = \frac{P_{c2} (1-a) - P_{c2}}{f_2^2 (1-a)} + \frac{P_{c1} a^2}{f_2^2 (1-a)} \quad (\text{A. 18})$$

$$C_p = \frac{P_{c2} (1-a-1) + P_{c1} a^2}{f_2^2 (1-a)} \quad (\text{A. 19})$$

$$C_p = \frac{-P_{c2} a + P_{c1} a^2}{f_2^2 (1-a)} \quad (\text{A. 20})$$

$$C_p = \frac{a(-P_{c2} + P_{c1} a)}{f_2^2 (1-a)} \quad (\text{A. 21})$$

Dessa forma, conforme (A. 1) e (A. 2) tem-se:

$$P_{p1} = C_p f_1^2 = \frac{P_{c2} - P_{c1} a}{a(a-1)} \quad (\text{A. 22})$$

$$P_{p2} = C_p f_2^2 = \frac{P_{c2} - P_{c1} a}{(a-1)} \quad (\text{A. 23})$$

$$P_{h1} = C_h f_1 = \frac{a^2 P_{c1} - P_{c2}}{a(a-1)} \quad (\text{A. 24})$$

$$P_{h2} = C_h f_2 = \frac{a^2 P_{c1} - P_{c2}}{(a-1)} \quad (\text{A. 25})$$

Onde:  $P_{p1}$  e  $P_{p2}$  são as perdas por correntes de Foucault do corpo de prova [W] para fluxo senoidal na frequência  $f_1$  e  $f_2$  [Hz] respectivamente.  $P_{h1}$  e  $P_{h2}$  são as perdas por histerese [W] do corpo de prova para fluxo senoidal na frequência  $f_1$  e  $f_2$  [Hz] respectivamente.

## APÊNDICE B – Análise das expressões de $k_1$ e $k_2$

O *software* do SAMA utiliza a expressão (B. 2) para o cálculo de  $k_1$  e (B. 4) para o  $k_2$ . A norma brasileira NBR 5161 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977) calcula os coeficientes de perdas por correntes induzidas ( $C_p$ ) e as perdas por histerese ( $C_h$ ) utilizando (A. 21) e (A. 25).

Multiplicando e dividindo  $k_1$  (B. 1) por  $a$  (A. 6) tem-se:

$$k_1 = \frac{P_{c2} f_2 - P_{c1} \frac{f_2^2}{f_1}}{f_2^2 (f_2 - f_1)} \quad (\text{B. 1})$$

Dividindo (B. 1) por  $f_1^{-1}$  tem-se:

$$k_1 = \frac{a P_{c2} - a^2 P_{c1}}{f_2^2 (a - 1)} \quad (\text{B. 2})$$

Que corresponde à expressão (A. 21).

Para  $k_2$ , divide-se (B. 3) por  $f_1^2$  tem-se:

$$k_2 = \frac{a^2 P_{c1} - P_{c2}}{a (f_2 - f_1)} \quad (\text{B. 3})$$

Que corresponde a

$$k_2 = \frac{a^2 P_{c1} - P_{c2}}{f_2 (a - 1)} \quad (\text{B. 4})$$

A expressão (B. 4) é igual a (A. 25).



## **APÊNDICE C - Diagrama funcional da fonte de alimentação do SDMA**

O projeto e montagem da fonte de alimentação foi realizado por fornecedor externo, uma vez que exigiria uma tecnologia fora de nosso alcance e não sendo foco imediato deste trabalho

A fonte de alimentação foi projetada para realizar as medições das grandezas necessárias para o cálculo das variáveis envolvidas no processo de medição, além de fornecer um sinal senoidal de tensão com amplitude e frequência ajustável remotamente por intermédio do computador.

Foram ainda incorporadas as funções de proteção contra curto-circuito na saída e sobrecarga, e também a limitação de amplitude e frequência do sinal de referência provenientes do computador.

O diagrama funcional apresentado na Figura C - 1 apresenta os seguintes blocos principais(SUPPLIER PROJETO EM ENGENHARIA ELÉTRICA LTDA, 2004):

### **Fusível e chave liga-desliga**

Inicialmente a fonte é alimentada pela rede com uma tomada a 3 pinos (fase, neutro e terra). Foi inserido em série um fusível de 6 Amperes com ação retardada para proteger a fonte contra sobrecargas e curto-circuito. Após o fusível, podemos encontrar a chave liga-desliga, com sinalização luminosa.

### **Relé de potência**

Após a chave de entrada, o circuito de potência possui um relé que é responsável pelo acionamento do circuito de potência. Esse relé é normalmente aberto, e seu acionamento ocorre somente após a fonte de alimentação auxiliar estar estabilizada.

### **Filtro de entrada**

O filtro de entrada é composto por indutores e capacitores e é responsável por conferir uma melhora substancial no fator de potência da fonte. Outra função é a limitação da corrente máxima da fonte durante uma possível falha, protegendo os componentes da mesma. Nesse bloco encontra-se também implementado um circuito de proteção contra sobre-tensão de entrada e um filtro de interferência eletromagnética.

### **Retificador**

Nesse estágio ocorre o processamento CA-CC da fonte. O retificador é responsável por prover um barramento de tensão CC ao inversor. Nesse estágio podemos também encontrar um circuito de descarga do barramento, que é acionado quando a fonte é desligada.

**Inversor**

É o circuito responsável pela conversão CC-CA, disponibilizando uma tensão de saída com frequência e amplitude variável dentro das especificações propostas.

**Potência**

É onde se encontram os componentes eletrônicos responsáveis pelo processamento de energia. O circuito empregado trabalha em frequência elevada, buscando uma redução do volume dos magnéticos. Além dessa característica, o circuito possui um circuito de snubber ativo que confere a fonte uma alta eficiência e uma diminuição do conteúdo harmônico emitido.

**Circuito de comando**

É responsável pelo chaveamento dos interruptores do inversor. Possui isolamento ótico, proteção contra curto-circuito e sinalizações.

**Circuito de controle**

Este bloco é responsável pelo controle da tensão de saída do inversor, conforme o sinal de referência fornecido pela placa de aquisição.

**Transformador**

O transformador de saída possui como principal função a isolação galvânica entre a rede elétrica e a fonte, conferindo ao equipamento maior segurança na sua operação.

Inicialmente esse transformador estava previsto na entrada da fonte, logo após a chave liga desliga. Devido a problemas ocasionados pela placa de aquisição utilizada pela empresa para a geração dos sinais de referência, que possuía em sua saída um nível CC que comprometia o ensaio, o transformador foi transferido para a saída. Com essa solução o problema foi sanado.

**Sensores**

Para a medição das principais grandezas elétricas de interesse no ensaio, foram utilizados sensores de Efeito Hall que conferem medidas com alta linearidade e as disponibiliza para a placa de aquisição. As grandezas medidas são: corrente de saída da fonte, tensão de saída (PC-P0) e as tensões de saída do sistema S1-S0 e SC-S0.

Transdutor de tensão da LEM<sup>8</sup> modelo CV 3-200/SP6, com faixa de operação de 0 a 100V;  $\pm 0,25\%$  de precisão e tempo de resposta de

---

<sup>8</sup> Marca registrada da LEM Electronic Components



3  $\mu$ s. Transdutor de corrente também da LEM CT 10-T com faixa de operação de 0 a 10 A,  $\pm 0,1\%$  de precisão e tempo de resposta menor que 1  $\mu$ s.

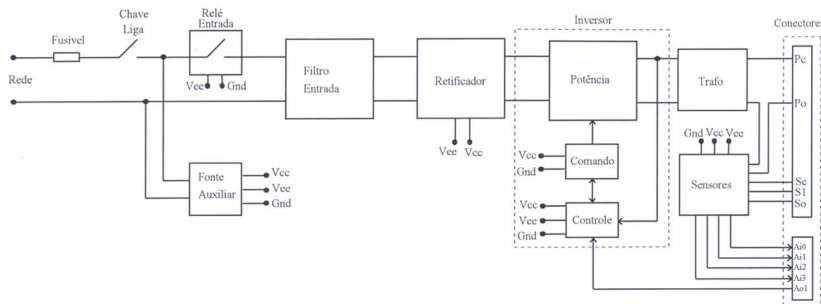
### Conector de potência

Possui as conexões de potência com o quadro de Epstein. A tensão de saída é levada até os terminais PC e P0. São recebidas as tensões provenientes do enrolamento secundário do quadro de Epstein S1, SC e S0.

### Conectores de sinais

Conecta os sinais provenientes dos sensores à placa de aquisição. Também recebe o sinal de referência para a tensão de saída, que é levado até a placa de controle do inversor.

Figura C - 1 – Diagrama funcional da fonte CA



Fonte: Supplier Projetos em Engenharia Elétrica Ltda, (2004)

### Placa de aquisição de dados

Placa de aquisição da National Instruments PCI-6036-E tem como características principais 16 entradas analógicas; 2 saídas analógicas; 8 entradas e/ou saídas digitais ( $\pm 10$  V) e taxa de amostragem de 10 kS/s.

Foram utilizadas quatro entradas analógicas para a leitura dos sinais (medição) e 1 saída analógica como referência para a fonte de corrente.

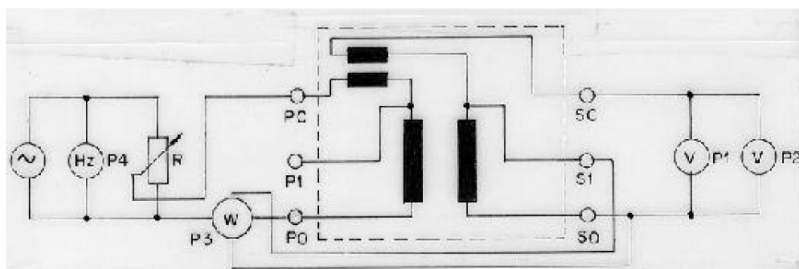


## APÊNDICE D – Procedimento para ensaio de perdas em quadro de Epstein para o SAMA

### Instrumentação:

P1 - Voltímetro de 1000  $\Omega/V$  ( $U_f$ ); P2 – Voltímetro de 200  $\Omega/V(U_{rms})$ ; P3 - Wattímetro monofásico de baixo fator de potência; P4 – Frequencímetro (Hz); R – Reostato; Quadro de Epstein de 25 cm. Os instrumentos utilizados devem ser da classe de exatidão 0,5 ou com maior precisão.

### Esquema de ligação



Fonte: Yokogawa Electric Works Ltd., ([19--])

### Procedimento de ensaio:

Determinar a massa total do corpo de prova (amostras) em gramas (g).

Colocar as chapas (amostras) no quadro de Epstein, conforme especificações normativas.

Determinar a massa efetiva, ou magneticamente efetiva, do corpo de prova, pela equação (D. 1).

$$m' = \frac{M \cdot l}{4 \cdot L} \quad (D. 1)$$

Onde:  $m'$  é o valor efetivo da massa do corpo de prova dado em gramas [g],  $M$  massa total do corpo de prova em gramas [g],  $l$  é o comprimento efetivo do circuito magnético dado em centímetros [cm],  $L$  o comprimento do corpo de prova em centímetros [cm] e 4 que representa os quatro braços do quadro de Epstein.

Determinar a área da seção transversal aplicando a equação (D. 2):

$$S = \frac{M}{4 \cdot L \cdot D} \quad (D. 2)$$

Onde:  $S$  representa a área da seção transversal em centímetros quadrados [cm<sup>2</sup>] e  $D$  a densidade volumétrica ou peso específico do corpo de prova em gramas por centímetro cúbico [g/cm<sup>3</sup>].

Determinar a tensão a ser aplicada para a frequência de 60 Hz, dado pela equação (D. 3).

$$Uf = \frac{4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot S}{10^4} \cdot B_m \quad (D. 3)$$

Onde:  $Uf$  é a tensão a ser aplicada em volts (V);  $N_2$  o número de espiras do enrolamento secundário do quadro de Epstein ( $N_2 = 700$ );  $f$  representa a frequência dada em Hertz (Hz) e  $B_m$  é o valor de pico da densidade de fluxo em Teslas (T).

Desmagnetizar o corpo de prova aplicando uma tensão da ordem de 40 volts (CA), reduzindo lentamente este valor até zero.

Aplicar tensão, gradativamente a partir de zero, até o voltímetro de fluxo (1000  $\Omega/V$ ) marcar o valor calculado no item 5, não devendo ultrapassar este valor. Caso ultrapasse, deve-se proceder a desmagnetização do corpo de prova, conforme descrito no item 6.

Efetuar as leituras necessárias no voltímetro de valor eficaz (V) e wattímetro (W), e registrar no formulário, bem como as escalas dos instrumentos utilizados ( $Uf$ , V e W).

Diminuir a tensão aplicada gradativamente até zero e desligar a alimentação.

Repetir os itens 5 a 9 para a frequência de 50 Hz.

## Cálculos

### Resistência Equivalente (R)

Devido à grande variação das grandezas envolvidas no ensaio, os valores da resistência interna dos instrumentos é função da escala em que ele é utilizado, dessa forma o cálculo dado por (D. 4) utiliza os valores de resistência de suas respectivas faixas de medição, conforme apresentado no Quadro D - 1.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R(Uf)} + \frac{1}{R(Urms)} + \frac{1}{R(Pw)} \quad (D. 4)$$

Onde  $R$  representa a resistência equivalente dada em ohms ( $\Omega$ ),  $R(U_f)$  é a resistência interna do voltímetro de 1000  $\Omega/V$  em ohms ( $\Omega$ );  $R(U_{rms})$  a resistência interna do voltímetro de 200  $\Omega/V$  em ohms ( $\Omega$ ) e  $R(P_w)$  a resistência interna do wattímetro de 50  $\Omega/W$  em ohms ( $\Omega$ ).

Quadro D - 1 – Resistência interna dos instrumentos em função da escala de medição

$U_f$ (V)	$U_{rms}$ (V)	$P_w$ (W)	$R$ ( $\Omega$ )	
30	15	30	967	
		60	1428	
	30	30	1153	
		60	1875	
	75	75	2307	2307
			120	2750
30			1339	
60			2419	
75	75	120	4054	

Fonte: Yokogawa Electric Works Ltd., ([19--])

### Perdas nos instrumentos ( $P_{inst}$ )

As perdas dos instrumentos ( $P_{inst}$ ), dado em watts (W) é calculada por (D. 5), onde  $U_{rms}$  representa a tensão lida no voltímetro de 200  $\Omega/V$  em volts (V) e  $R$  a resistência equivalente dos instrumentos de medição em ohms ( $\Omega$ ).

$$P_{inst} = \frac{U_{rms}^2}{R} \quad (D. 5)$$

### Potência útil absorvida ( $P_{util}$ )

A potência útil absorvida (D. 6) pelo sistema é calculada pela diferença entre os valores da potência lida ( $P_r$ ) e da potência dissipada pelos dos instrumentos de medição ( $P_{inst}$ ) e é dada em watts (W).

$$P_{util} = P_r - P_{inst} \quad (D. 6)$$

O valor de  $P_r$  é dado pela potência lida no wattímetro em watts (W) vezes o fator de multiplicação de escala do instrumento.

### **Perdas no ferro (Pfe)**

A equação (D. 7) é utilizada para o cálculo das perdas no ferro, em watts por quilograma (W/kg), levando em consideração as parcelas de perdas por histerese e correntes parasitas.

$$Pfe = \frac{P_{util} \cdot 100}{h + \left(\frac{U_{rms}}{U_f}\right)^2 \cdot ep} \cdot \frac{1}{m'} \quad (D. 7)$$

Onde  $h$  representa o percentual de perdas por histerese e  $ep$  o de perdas por correntes parasitas ou Foucault, cujos valores são obtidos no Quadro 6-2.

## APÊNDICE E - Determinação das curvas de Magnetização ( $B \times H$ ) e Permeabilidade ( $\mu \times H$ ) no SAMA.

### Informações gerais:

Podem ser utilizadas as frequências de 50 Hz ou 60 Hz.

A determinação da curva de magnetização  $B \times H$  é realizada na mesa de ensaio Figura E - 1 e a bancada é operada do painel de comando, mostrado em detalhes na Figura E - 2.

Figura E - 1 – Mesa de ensaio do SAMA



Equipamentos da mesa de ensaio

- |                                   |                                                |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|
| 1 – Quadro de Epstein             | 5 – Voltímetro de fluxo (1000 $\Omega$ /Volts) |
| 2 - Frequencímetro (25 – 67,5 Hz) | 6 – Painel de comando                          |
| 3 – Wattímetro                    | 7 – Amperímetro                                |
| 4 – Voltímetro de tensão eficaz   | 8 – Reostato de variação da tensão do gerador  |

Figura E - 2 – Detalhe do painel de comando



- |                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 – Chave de alimentação do comando | 4 – Ajuste grosso da frequência |
| 2 – Chave de seleção                | 5 – Ajuste fino da frequência   |
| 3 – Chave liga/desliga do gerador   |                                 |

### Observações:

Para o indutor de 1 A a faixa de variação de  $V_{f1}$  deve ser de 0 a 60 V, e para o indutor de 10 A a faixa de variação deve ser de 0 a 50 V.

O número de pontos escolhidos para  $V_{f1}$ , tensão a ser aplicada no ensaio, deve estar entre 10 e 12 pontos, sendo que para valores iniciais de  $V_{f1}$  (até 20 V) os intervalos entre estes pontos devem ser menor que os demais, e também possuir o maior número de pontos localizados nesta faixa (8 pontos) permitindo assim uma boa visualização do comportamento da curva.

Para a determinação da curva de magnetização  $B \times H$  as amostras de chapa de aço devem ser desmagnetizadas. Para isto, deve-se aplicar uma corrente alternada suficiente para magnetizar as chapas de aço acima do ponto de saturação (em torno de 10 A) e em seguida reduz-se lentamente a intensidade de corrente até zero ou um valor muito próximo a zero.

O ensaio pode ser realizado logo após a desmagnetização das chapas.

Durante o ensaio é importante observar em todos os pontos de ensaio a máxima corrente que pode circular pelos indutores.

### Execução do ensaio

Girar totalmente o reostato (posição 1) no sentido horário, estabelecendo assim ao ligar o gerador a tensão de zero Volts.

Ligar o gerador, acionando a chave da posição 4 para cima e da posição 6 para baixo.

Ajustar a frequência desejada (posição 2 e 3).

Posicionar a chave de seleção (posição 5) em 03.

Aplicar a tensão  $V_{f1}$  no voltímetro de fluxo (posição 8) girando o reostato no sentido anti-horário e em seguida fazer a leitura de  $V_{f2}$ , posicionando a chave de seleção (posição 5) em 04. Fazer a leitura de



Vf1 e Vf2 para todos os pontos de tensão, tomando o cuidado do item 3.11.

Girar o reostato totalmente no sentido horário, após todos os pontos de tensão, diminuindo assim a tensão do gerador.

Nota: A chave de seleção nas posições 03 e 02 trabalha com o indutor de 1 A.

### Resultados:

Intensidade de Campo Magnético ( $H$ )

É calculada com base nos dados de  $Vf1$  e  $K$ , onde se utiliza a equação (E. 1) para o cálculo de  $H$  em Oersted (Oe) e a (E. 2) para  $H$  em Ampère espira por centímetro (Ae/cm).

$$H = 9,36 \cdot \frac{Vf1}{K} \quad (\text{E. 1})$$

$$H = 7,45 \cdot \frac{Vf1}{K} \quad (\text{E. 2})$$

Os valores de  $K$  são dados na Quadro E - 1.

Quadro E - 1 – Valores de  $K$  para os indutores de 1 A e 10 A

F (Hz)	Indutores	
	1 A	10 A
50	54	4,1
60	65	4,9

Fonte: Yokogawa Electric Works Ltd., ([19--])

### Indução Magnética ( $B$ )

A indução magnética  $B$  dada em Tesla [T] é calculada por (E. 3), onde:  $Vf2$  é a tensão medida no ensaio em Volts [V];  $N2$  o número de espiras do enrolamento secundário do quadro de Epstein igual a 700;  $f$  é a frequência em Hertz [Hz];  $S$  a área da seção transversal da amostra em centímetros quadrados [cm<sup>2</sup>] e  $B$  a indução magnética dada em Tesla [T].

Obs.: 1 T (Tesla) = 104 Gauss.

$$B = \frac{Vf2 \cdot 10^4}{4,44 \cdot N2 \cdot f \cdot S} \quad (\text{E. 3})$$

### Permeabilidade Magnética ( $\mu$ )

A permeabilidade magnética  $\mu$  dada em Webber por Ampère metro (Wb/Am) é calculada por (E. 4), onde  $B$  é a indução magnética dada em Gauss [G] ou Tesla [T];  $H$  é a intensidade e campo magnético dado em Oersted [Oe] ou Ampère espira por metro [Ae/m].

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (\text{E. 4})$$

### Permeabilidade Magnética Relativa [ $\mu_r$ ]

Dada por (E. 5), a permeabilidade relativa  $\mu_r$  é adimensional e relaciona a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) em Webber por Ampère metro [Wb/Am] ou Gauss por Oersted [Gauss/Oe] com a permeabilidade no vácuo ( $\mu_0$ ) dada por  $4.\pi.10^{-7}$  Wb/Am.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (\text{E. 5})$$